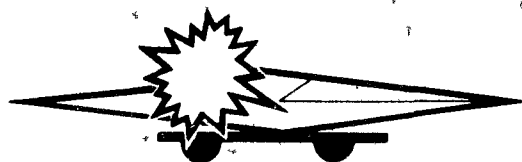


FUTURE AUTOMOTIVE FUELS



- Prospects
- Performance
- Perspective

Edited by

JOSEPH M. COLUCCI and NICHOLAS E. GALLOPOULOS

General Motors Research Laboratories

PLENUM PRESS • NEW YORK — LONDON • 1977

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АВТОМОБИЛЬНЫЕ ТОПЛИВА

ВИДЫ
ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПЕРСПЕКТИВЫ

перевод с английского
А.П. Чочиа

под редакцией
доктора технических наук
профессора Я.Б. Черткова



Москве "Транспорт" 1982

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Перспективные автомобильные топлива. Пер. с англ. — М.: Транспорт. 1982. — 319 с.

В книге приводятся доклады ведущих специалистов США, ФРГ и Великобритании по топливно-энергетическим проблемам на симпозиуме «Автомобильные топлива будущего — ресурсы, характеристика, прогнозы», организованном исследовательскими лабораториями фирмы «Дженерал Моторс», проходившем в октябре 1975 г в г Уоррене, штат Мичиган, США.

Книга тематически разделена на четыре части, соответствующие четырем заседаниям симпозиума.

В докладах освещены: методы получения и свойства автомобильных топлив из ненефтяного сырья и твердых горючих ископаемых (угля, горючих сланцев), а также метанола, водорода и азотсодержащих соединений, которые в будущем могут использоваться для удовлетворения потребности автомобильного транспорта; возможности использования атомной энергии для производства автомобильных топлив; влияние технического совершенствования автомобилей на улучшение их топливной экономичности.

Большое внимание в книге уделено оригинальным методам моделирования, испытания и расчетов с целью оценки экономических показателей различных топлив.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников автомобильного транспорта и химмотологов.

Ил. 152, табл. 59, библиогр. 209 назв.

Книга рекомендована к изданию Государственным научно-исследовательским институтом автомобильного транспорта.

Зав редакцией Н. К. Конышева

Редакторы О. В. Яременко, Б. А. Кузнецов

3603000000-428 034-81
049(01)-82

© 1977, Plenum Press, New York
© Перевод на русский язык,
издательство «Транспорт», 1982

В современных условиях проблема энергетического обеспечения жизнедеятельности населения земного шара приобретает большую, непрерывно возрастающую значимость. Ресурсы природных органических ископаемых энергоносителей, в особенности нефти и природного газа, постепенно истощаются, затраты на их получение возрастают, потребность же в них повсеместно стремительно растет.

Энергетический кризис, охвативший капиталистические страны в 70-х годах, резко отразился на развитии мировой экономики. Возникла острая необходимость изыскания возможностей замены части природных топлив, главным образом нефтяных, другими видами энергоносителей. В настоящее время в ряде стран (США, ФРГ, Бразилия и др.) получают на промышленных установках различные синтетические топлива и применяют их на автомобильном транспорте.

Социалистической экономике кризисные явления не присущи. СССР является страной, наиболее обеспеченной природными ресурсами всех видов источников энергии. Тем не менее со временем неизбежно возрастают трудозатраты и капиталовложения в их получение. Это заставляет уделять должное внимание работам, направленным на уменьшение энергопотребления и изыскание новых видов энергоносителей. В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года», принятых на XXVI съезде КПСС, большое внимание уделено энергетике, необходимости создания и внедрения эффективных методов комплексного использования и переработки твердых и тяжелых жидких топлив, а также получению синтетических топлив. В связи с этим в СССР широкое развитие получают исследования, направленные на уменьшение потребления нефтяных видов топлив.

Автомобильный транспорт является основным потребителем нефтяных топлив. Поэтому несомненный интерес представляет предлагаемый читателю сборник докладов, сделанных на симпозиуме, проведенном в США и специально посвященном перспек-

тивными автомобильным топливам. Хотя симпозиум состоялся в 1975 г., тем не менее материалы докладов в преобладающем большинстве своем не устарели. В докладах, представленных крупными специалистами развитых капиталистических стран, рассмотрены технические, технологические, социальные, экономические и экологические аспекты перехода к применению новых видов топлив на автомобильном транспорте. Многие сведения, содержащиеся в докладах, представляют значительный интерес и сохраняют актуальность в методическом отношении.

В докладах не уделено внимания углеводородным газам. Это объясняется тем, что в США крайне ограничены их ресурсы, поэтому в качестве возможного автомобильного топлива они не рассматриваются. В то же время СССР располагает богатейшими месторождениями природного газа, который является одним из основных перспективных энергоносителей для автомобильного транспорта. Добыча природного газа в 1985 г. будет доведена в нашей стране до 600—640 млрд. м³. В настоящее время отечественной промышленностью уже выпускаются газобаллонные автомобили (ЗИЛ-138, ГАЗ-53-04, ГАЗ-52-04). Пока они работают на сжиженном газе (бутан-пропане), но уже развивается производство автомобилей, работающих на природном газе в сжатом состоянии под давлением 200 кг/см². Публикуемые доклады по синтетическим жидким топливам, получаемым из сланцев и углей, а также по применению метанола содержат ценные сведения и представляют интерес, поскольку в СССР эти виды топлив рассматриваются как перспективные. Исследования по ним проводятся постоянно. Автомобили, работающие на топливе с метанолом, уже находятся в опытной эксплуатации.

Некоторые из публикуемых докладов носят узкоспециальный характер или могут представлять лишь методический интерес. К ним относятся доклады о влиянии ядерной энергии на топливо для транспорта, использовании водорода или азотоводородных соединений в качестве автомобильного топлива и др. Тем не менее определенный интерес они могут представлять, поэтому опубликование их оправдано. Преобладающая же часть докладов, помещенных в сборнике, представляет интерес для широкого круга специалистов, и использование содержащихся в них сведений будет способствовать развитию применения в СССР новых видов автомобильных топлив взамен нефтяных.

Член-корр. Академии наук СССР, заведующий сектором Института комплексных транспортных проблем Д. П. ВЕЛИКАНОВ

ОТ РЕДАКТОРА РУССКОГО ИЗДАНИЯ

Лаборатории фирмы «Дженерал моторс» на своих симпозиумах рассматривают различные проблемы, касающиеся автомобильного транспорта. 19-й симпозиум, материалы которого составляют содержание настоящей книги, был организован в 1975 г. и целиком посвящен перспективным автомобильным топливам. В США сборник докладов, сделанных на симпозиуме, вышел в 1977 г. под названием «Автомобильные топлива будущего — ресурсы, характеристики, прогнозы». Доклады были сделаны ведущими специалистами ряда фирм США, ФРГ и Великобритании, занимающихся планированием и исследованием возможностей производства и применения синтетического топлива для транспорта, а также обоснованием требований к качеству такого топлива.

На основании результатов испытаний топлива на двигателях и расчетов, в том числе при помощи моделирования, в докладах делаются выводы и даются рекомендации в энергетическом, технологическом и экономическом аспектах. Прошедшее после симпозиума время показало, что не все сделанные в докладах прогнозы оправдались. В определенной степени это связано с тем, что ряд факторов, оказывающих существенное влияние на топливную политику капиталистических государств, не поддаются или трудно поддаются прогнозированию.

Необходимо отметить, что исследования, результаты которых изложены в докладах, проводились независимо друг от друга и носят автономный характер, в связи с чем как общее название сборника, так и разбивка его на разделы в достаточной степени условны.

В докладах большое внимание уделяется методической стороне работы, а также проблеме загрязнения окружающей среды отработавшими газами при эксплуатации двигателей на новых видах топлива.

Материалы симпозиума представляют интерес для исследователей, конструкторов, эксплуатационников, работающих в области перспективных автомобильных двигателей и топлив.

Доктор технических наук, профессор Я. Б. ЧЕРТКОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ К АМЕРИКАНСКОМУ ИЗДАНИЮ

В октябре 1975 г. исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс» провели девятнадцатый ежегодный симпозиум. В настоящей книге публикуются доклады симпозиума, посвященного прогнозам, применению и перспективам автомобильного топлива в будущем. Доклады и дискуссии, которые имели место на симпозиуме, могут оказаться полезными для исследований и усовершенствований в области автомобильного топлива.

Эмбарго на нефть показало, как велика зависимость США от импортной нефти. Поскольку нефть в настоящее время является единственным источником автомобильного топлива (легковые и грузовые автомобили потребляют около 43% нефтепродуктов, расходуемых страной), эмбарго на нефть наиболее сильное влияние оказало на автомобильный транспорт. Вначале возникли большие очереди на автозаправочных станциях, а затем — бездействующие конвейеры на автосборочных заводах и новые безработные. Симпозиум по перспективам автомобильным топливам был призван найти выход из этого тяжелого положения.

На симпозиуме было предложено сделать доклады специалистам, представляющим промышленность, правительство и научные учреждения. Часть докладов носит характер прогнозов. Следовательно, на выводы, которые делаются в этих докладах, могут оказать влияние непредвиденные события или дополнительная новая информация. Приводимые в настоящей работе оценки в будущем могут подвергнуться пересмотру в связи с появлением новых методов производства топлива и новых двигателей. Поэтому эту книгу следует рассматривать в качестве трамплина для будущих исследований, а не как законченный труд по перспективам топливам.

Джозеф М. КОЛУЧЧИ, Николас Е. ГАЛЛОПУЛОС

Первая часть АВТОМОБИЛЬНЫЕ ТОПЛИВА (РЕСУРСЫ, ПОТРЕБНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ)

Председатель заседания Ф. С. МАЙЕРС
Висконсинский университет Мэдисон, штат Висконсин, США

ПРОГНОЗ ПОТРЕБНОСТИ В АВТОМОБИЛЬНОМ ТОПЛИВЕ

Р. Ф. ХЕМФИЛЛ младший, К. ДИФИЛИО
Федеральное энергетическое управление,
Вашингтон, округ Колумбия

Приводится прогноз потребности в автомобильном топливе до 1990 г. независимо от его природы и свойств (этилированном и неэтилированном бензине, дизельном топливе), а также прогноз детонационной стойкости топлива и др. Анализ не привязан к определенной конструкции двигателя. Прогноз получен с помощью математической модели, учитывающей к п д по топливу новых автомобилей, сбыт и долю новых автомобилей на автомобильном рынке, сдачу в лом использованных автомобилей и пробег автомобилей. Рассматриваются факторы, оказывающие влияние на характеристику автомобилей.

Введение. В связи со значительным ростом цен на энергию в настоящее время и в прогнозируемом будущем в экономике страны возможны фундаментальные сдвиги.

Средства, вкладывавшиеся в потребляющие энергию изделия и предприятия, перемещаются в относительно более эффективные или требующие меньшего потребления энергии изделия и предприятия.

Этот процесс особенно заметен в транспортном секторе, потребляющем 51% нефтепродуктов, и в наибольшей мере — на автомобилях индивидуального пользования, на долю которых приходится потребление 74% наиболее дорогостоящих нефтепродуктов, идущих для транспортных средств. Произошли сокращение автомобильного рынка и значительное увеличение выпускаемых и приобретаемых населением автомобилей с более высоким к п д по топливу. Достигнутые и предполагаемые усовершенствования в области повышения топливной экономичности автомобилей в конечном счете могут быть сведены на нет высокой стоимостью топлива.

Такие выводы можно сделать на основании исследований Федерального энергетического управления.

Исследования были проведены с целью определения изменений государственной политики на сбыт бензина и автомо

билей. Анализ этой политики должен учитывать ожидаемое ограничение загрязнения окружающей среды и прекращение введения дополнительных бензиновых налогов, автомобильных акцизных сборов или обязательных норм по экономии топлива. В докладе анализируется основной вариант прогноза, несмотря на то, что при этом возникает целый ряд неопределенностей. Рассматриваются различные факторы, оказывающие влияние на потребление топлива.

Принятый подход к составлению прогноза включает несколько переменных показателей, которые вместе определяют потребность в топливе. Попытки прогнозирования потребности в топливе без учета изменения потребностей в автомобилях, характеристики новых автомобилей, списания автомобилей в лом и пробега автомобилей представляют интерес, но при этом не принимается во внимание влияние более высокой стоимости энергии на эффективность эксплуатации автомобилей. Поскольку учет этих факторов позволит смягчить влияние изменения стоимости топлива при прогнозировании на более длительный срок (3—6 лет с начала изменения цен), желательно оценить экономию топлива, которая будет достигнута на новых моделях автомобилей, учесть списание автомобилей, оказывающих влияние на эксплуатационные показатели автомобильного парка, и использовать эти показатели для оценки пробега автомобилей в зависимости от других переменных. Кроме того, если специальный курс правительственной политики имеет целью оказать влияние на выбор потребителями автомобилей, то важное значение будет иметь характер сбыта новых автомобилей.

В докладе приводится описание системы уравнений модели¹ и краткое рассмотрение ее структуры.

Факторы, влияющие на владение и характеристику автомобилей. Мотивы, которыми руководствуется владелец автомобиля, несколько сложнее мотивов владельцев других готовых изделий. На спрос на автомобили оказывают влияние их пробег и окружающие транспортные условия. Автомобили, безусловно, являются наиболее привлекательным транспортным средством, сочетающим в себе комфорт, маневренность, выигрыш во времени и ценность как личной собственности. Характеристика спроса на автомобили определяется не только их назначением для использования в качестве транспортного средства. Например, желание купить новый автомобиль вместо старого лишь частично обусловлено потребностями в транспорте. Уайкофф [1] отмечает следующие факторы, учитываемые при приобретении нового автомобиля: эстетические соображения, престиж владельца нового автомобиля, надежность и относительная убежденность в превосходстве нового автомобиля.

¹ Модель разработана Дж. Фосетом с сотрудниками по контракту с Федеральным энергетическим управлением.

С точки зрения прогнозирования потребности в топливе различное отношение владельца к новому и старому автомобилю имеет очень важное значение. Влияние на экономию топлива новых автомобилей с усовершенствованной топливной системой в большой степени зависит от соотношения новых и старых автомобилей в эксплуатируемом парке. Поэтому в принятых методах прогнозирования учитывается как сбыт новых автомобилей, так и списание автомобилей в лом, что, в свою очередь, зависит от цены и топливной экономичности новых автомобилей. Темп, с которым топливная экономичность новых автомобилей будет оказывать влияние на экономичность автомобильного парка, можно определить без оценки срока амортизации, который принимается постоянным. При этом важное значение имеет учет списания автомобилей, проводимый по их рыночным классам.

Владение автомобилем определяется в первую очередь индивидуальным или семейным доходом. На это указывают данные, собранные Федеральным управлением автомобильных дорог при исследовании использования индивидуальных автомобилей [2], а также другие работы [3; 4].

На рис 1 приводятся результаты исследования использования индивидуальных автомобилей в стране. Как видно из рисунка, между владением автомобилями (считая на семью¹) и доходами нет линейной зависимости. Количество автомобилей в семьях с доходами от низкого до среднего уровня увеличивается значительно быстрее, чем с доходами от среднего до высшего, что, очевидно, свидетельствует об эффекте насыщения. Это можно видеть на рис. 2.

Если не учитывать отличие центральных городов от пригородов, влияние географических факторов на содержание автомобилей невелико. В расчете на одну семью разница между числом автомобилей в сельской местности и в городах составляет 12%. В расчете на население в целом существенной разницы нет (дан-

¹ Всюду далее в целях наглядности вместо принятого в американской статистике термина «домовладение» используется термин «семья», более понятный советскому читателю. В США под домовладением (домашним хозяйством) понимают группу лиц, совместно владеющих определенным имуществом и не обязательно находящихся в родственных отношениях — Прим ред

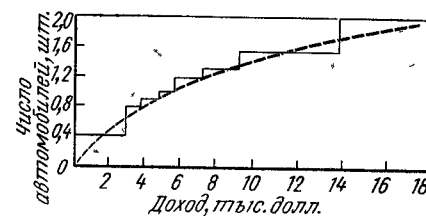


Рис 1 Число автомобилей, принадлежащих на семью в зависимости от ее дохода (1969—1970 гг.) [2]

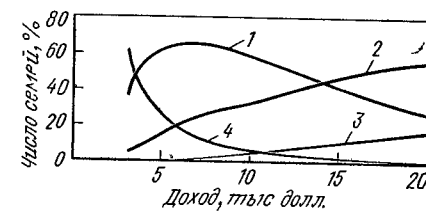


Рис 2 Доля семей, владеющих разным количеством автомобилей в зависимости от дохода семьи

1 — один автомобиль, 2 — два автомобиля, 3 — три и более автомобилей, 4 — нет автомобиля

Таблица 1. Факторы влияния на владение автомобилями в различных регионах и ареалах

Факторы влияния	Год и способ расчета	Источник	Отношение факторов, %
<i>Стандартный столичный / Нестандартный столичный ареал (ССА) / ареал (НССА)</i>			
ССА/НССА	1970—С	Перепись жилищного фонда, 1970 г	0,2
ССА/НССА	1960—С	Перепись жилищного фонда, 1960 г	4,0
ССА/НССА	1969—С	Исследование владения индивидуальными автомобилями	0,3
ССА/НССА	1970—С	Перепись населения, серии Р-65 и Р-23	0,7
ССА/НССА	1970—Н	Перепись жилого фонда, 1970 г	3,1
ССА/НССА	1960—Н	Перепись жилого фонда, 1960 г	2,3
Город-центр/пригороды	1970—С	Перепись жилого фонда, 1970 г	40,2
Город-центр/пригороды	1960—С	Перепись населения, 1960 г	41,0
Город-центр/пригороды	1970—С	Перепись населения, серии Р-65 и Р-23	45,7
Город-центр/пригороды	1970—Н	Перепись населения, 1970 г	23,2
Город-центр/пригороды	1960—С	Перепись населения, 1960 г	24,6

Город/сельская местность

Город/сельская местность	1970—С	Перепись жилого фонда, 1970 г	9,3
Город/сельская местность	1960—С	Перепись жилого фонда, 1960 г	12,5
Город/сельская местность	1960—Н	Перепись жилого фонда, 1970 г	0,8
Город/сельская местность	1960—Н	Перепись жилого фонда, 1960 г	0,0

Географические районы (перепись)

Высокорасположенные (горные штаты)/низкорасположенные (среднеатлантические штаты)	1970—С	Перепись жилого фонда, 1970 г	33,1
Высокорасположенные (горные штаты)/низкорасположенные (среднеатлантические штаты)	1960—С	Перепись жилого фонда, 1960 г	39,4
Высокорасположенные (тихоокеанские штаты)/низкорасположенные (среднеатлантические штаты)	1970—Н	Перепись жилого фонда, 1970 г	34,9
Высокорасположенные (тихоокеанские штаты)/низкорасположенные (юго-западный центр)	1960—Н	Перепись жилого фонда, 1960 г	48,4

Продолжение табл. 1

Факторы влияния	Год и способ расчета	Источник	Отношение факторов, %
<i>Доступность скоростных транспортных сообщений</i>			
Наличие скоростных транспортных сообщений/отсутствие скоростных транспортных сообщений	1970—С	Перепись жилого фонда, 1970 г	14,4
Наличие скоростных транспортных сообщений/отсутствие скоростных транспортных сообщений		Перепись жилого фонда, 1960 г	9,7
Наличие скоростных транспортных сообщений/отсутствие скоростных транспортных сообщений	1970—С	Перепись жилого фонда, 1970 г	3,6
Наличие скоростных транспортных сообщений/отсутствие скоростных транспортных сообщений	1960—С	Перепись жилого фонда, 1960 г	6,5

Примечание С — исходя из расчета на семью, Н — исходя из расчета на население

ные переписи). Влияние географического фактора сказывается при сравнении числа автомобилей в центральных городах и пригородах. В пригородах автомобилей на 40% больше, принимая в основу расчета семью (данные переписи). Наблюдается различие во владении автомобилями между девятью территориально-статистическими районами. Наиболее высокий процент числа владельцев автомобилей в районах Скалистых гор и Тихоокеанского побережья, наиболее низкий — в Среднеатлантическом районе (33%).

Межгородские транспортные сообщения оказывают удивительно незначительное влияние на число владельцев автомобилей. В городах, не располагающих экспрессными междугородскими сообщениями, в расчете на семью в среднем на 14% больше автомобилей, чем в городах, располагающих экспрессными междугородскими сообщениями (Бостон, Чикаго, Кливленд, Ньюарк, Филадельфия). Если исходить из численности населения, то эта разница снизится до 4%. Однако в городах, располагающих транзитными сообщениями, владельцев автомобилей значительно меньше, чем в городах, не располагающих ими. В Нью-Йорке владельцев автомобилей всего 60% по сравнению со средними показателями для всей страны. Статистические данные о владении автомобилями по районам и типам представлены в табл. 1.

Таблица 2. Автомобильные поездки по назначению [2]

Назначение поездок	Доля от общих автомобильных поездок, %	Доля от общего пробега автомобилей, %	Средняя длина рейса, км
Для «заработков на жизнь» из дома на работу смежные дела	31,9 4,3	33,7 7,9	15,1 25,9
Всего	36,2	41,6	16,4
По семейным делам за покупками в медицинские учреждения и к зубным врачам прочие	15,2 1,8 14,0	7,5 1,6 10,2	7,1 13,5 10,5
Всего	31,0	19,3	9,0
По гражданским, образовательным и религиозным делам	9,3	4,9	7,6
Общественные и развлекательные к друзьям и родственникам для развлечения в отпуск прочие	8,9 1,4 0,1 12,0	12,1 3,1 2,5 15,3	19,3 32,2 257,4 18,3
Всего	22,4	33,0	21,1
Прочие и непланируемые	1,1	1,2	15,1
Итого	100,0	100,0	14,3

В связи с изложенным выше допустимо прогнозировать владение автомобилями для страны в общей модели без учета географических факторов, влияющих на распределение автомобилей и транзитных межгородских сообщений. Кроме того, немного пользы можно извлечь от побочных переменных, которые сами по себе трудно поддаются прогнозированию. Даже если допустить, что доступность транзитных сообщений, например, оказывает значительное влияние на владение автомобилями, то и в этом случае включение этого показателя в качестве переменной не способствовало бы решению задачи, поскольку не ясно, какими будут транзитные сообщения в будущем.

К другим факторам, которые были учтены при прогнозировании, относятся: реальная цена автомобилей по классам, топливная эффективность автомобилей по классам, реальная цена бензина, реальный доход, количество семей в каждой доходной группе и доля безработных.

Факторы, относящиеся к классификации автомобилей по рыночным классам, не использовались непосредственно для определения сбыта автомобилей и количества владельцев автомобилями. Они использовались в связи с определением проданных автомобилей каждого класса. Таким образом, можно оценить про-

дажную характеристику новых автомобилей и затем использовать ее (вместе с другими факторами) для определения сбыта. Далее для общего потребления топлива важное значение имеет его экономия за счет перехода на новые автомобили. Из цены и экономии топлива для отдельных классов автомобилей можно сделать анализ влияния курса на изменение в соотношении между экономикой и ценой топлива. Принятые методы моделирования дают возможность отразить в оценке пробега автомобиля и расхода бензина рыночные сдвиги (в сторону малолитражных автомобилей) и повышение топливной экономичности (увеличение пробега на литр бензина для автомобилей всех рыночных классов).

Модель, использованная для этих прогнозов, получена на основании соотношения цен автомобилей различных классов, экономии топлива и других различий в эксплуатационных расходах. Эти два показателя не принимались во внимание, поскольку отражались в покупной цене. Таким образом, выбранная модель учитывает только факторы, связанные со стоимостью, и не учитывает другие характеристики классов автомобилей. Поэтому следует полагать, что «средний», или типичный, автомобиль для каждого рыночного класса должен оставаться относительно однородным с точки зрения характеристик (вместимость, динамика, ресурс, оформление и т. д., не влияющих на цену в зависимости от времени).

Федеральное энергетическое управление поддерживает исследования с помощью моделей, учитывающих некоторые из этих показателей, но таких моделей пока нет. Кроме того, для прогнозирования основного варианта, характеристики, также не оказывающие влияния на цену, вряд ли подвергнутся значительным изменениям.

Факторы, влияющие на потребность в передвижении. В отличие от факторов, определяющих потребность владения автомобилем; мы располагаем более надежными данными относительно факторов, влияющих на передвижение людей. Наиболее детально в масштабе страны этот вопрос рассмотрен в обзоре, посвященном автомобильным поездкам и использованию индивидуальных автомобилей [2], подготовленным Федеральным управлением автомобильных дорог. Сведения о назначении поездок, приводимые в указанном труде, представлены в табл. 2.

Как видно из таблицы, наиболее важное место занимают поездки для заработков на жизнь. На эти цели приходится 42% всего пробега автомобилей и 36% поездок. Следующей крупной категорией являются семейные дела, составляющие 31% всех поездок, но всего 19% пробега автомобилей. На долю общественных поездок и поездок для отдыха приходится 33% пробега автомобилей и 22% всех поездок, а на долю туристских поездок — 3,1% общего пробега автомобилей. Поездки во время отпусков составляют 2,5% от общего пробега автомобилей и всего 0,1% всех поездок. Гражданские, учебные и религиозные поездки

Таблица 3 Автомобильные поездки в зависимости от назначения и места жительства [2]

Назначение поездки	Все ареалы	Стандартные столичные ареалы	Нестандартные столичные ареалы ¹	Населенные пункты, включенные в состав ареалов	Населенные пункты, не включенные в состав ареалов
<i>Процент от количества автомобильных поездок</i>					
Для «заработков на жизнь»	36,2	36,3	35,3	36,5	35,8
По семейным делам	31,0	30,7	31,7	30,8	31,5
По гражданским, образовательным и религиозным делам	9,3	9,2	9,5	8,9	10,0
Общественные и развлекательные	22,4	22,3	22,6	22,8	21,4
Прочие	1,1	1,2	0,9	1,0	1,3
Всего	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Процент от общего пробега автомобилей

Для «заработков на жизнь»	41,6	42,5	39,7	41,5	41,8
По семейным делам	19,3	18,3	21,4	18,0	21,5
По гражданским, образовательным и религиозным делам	4,9	4,8	5,1	4,3	6,0
Общественные и развлекательные	33,0	33,4	32,2	35,3	29,0
Прочие	1,2	1,0	1,6	0,9	1,7
Всего	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

¹ Оценка на базе основного источника с учетом граф «Стандартные столичные ареалы» и «Нестандартные столичные ареалы»

составляют 5% пробега всех автомобилей и 9% всех поездок. На прочие и неизвестные категории приходится несколько больше одного процента пробега и поездок.

Если назначение поездок разделить по месту жительства (табл. 3), то между населением, живущим в пределах и вне пределов стандартного столичного статистического ареала или районов, вошедших в зону городов, наблюдается удивительно небольшое различие. В частности, изменение в доле поездок по назначению для каждого географического типа по существу однообразно. Чуть большее различие наблюдается при рассмотрении распределения пробега автомобилей, поскольку средняя протяженность поездки в зависимости от степени урбанизации пусть незначительно, но меняется. В столичном ареале относительная протяженность поездок для «заработка на жизнь», а также по общественным делам и для отдыха несколько выше, а относительная протяженность поездок с гражданскими, образовательными и религиозными целями, а также по семейным делам — ниже.

В значительно большей степени протяженность поездок среди индивидуальных владельцев зависит от дохода. На рис. 3 представлена зависимость между доходом семьи и пробегом автомобиля, приходящимся на семью. В каждой группе с более высокими доходами наблюдается непрерывное увеличение пробега, приходящегося на автомобиль. Годовой пробег для категорий с наи более высоким доходом примерно в 2 раза больше годового пробега двух категорий с наиболее низкими доходами. При рассмотрении владения автомобилем в зависимости от дохода (см. рис. 1) соотношение между пробегом и доходом семьи еще более разительно. Пробег автомобилей в категории с самым высоким доходом примерно в 6 раз больше пробега автомобилей в двух категориях с наиболее низкими доходами.

Доходы оказывают также влияние на назначение поездок, но совсем не в такой степени, как на общее количество поездок и общую протяженность пробега автомобилей. В категориях с доходами выше 4 тыс и ниже 4 тыс долл в год назначение поездок различное (табл. 4). В категории с низким доходом относительно меньше поездок для «заработка на жизнь» и относительно больше поездок по семейным делам, а также по общественным делам и для отдыха. Следует, однако, помнить, что абсолютное количество поездок двух последних назначений в категориях с более высоким доходом выше, чем в категориях с низким доходом. Если считать по километражу, то относительное распределение поездок по назначению одинаковое, только они более значительны и продолжительны. На каждую следующую категорию с более высоким доходом приходится относительно больший километраж поездок для «заработков на жизнь», что указывает на большее расстояние от дома до места работы и на то, что для лиц с большим доходом работа, связанная с автомобильными поездками, значительнее.

Возраст водителей является одним из факторов, оказывающих влияние на километраж, приходящийся на водителя (табл. 5).

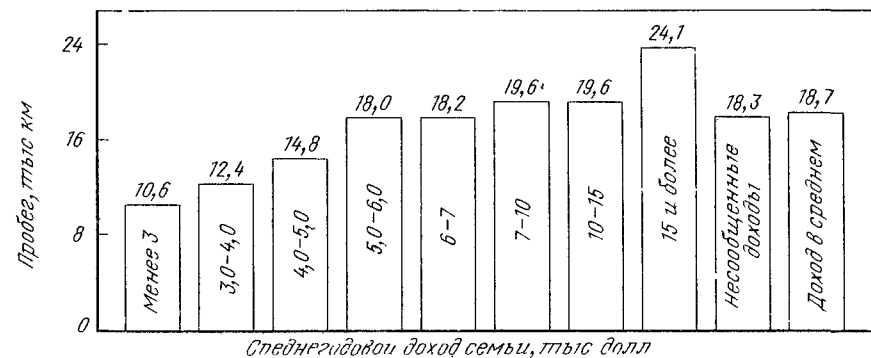


Рис. 3 Среднегодовой пробег автомобиля в зависимости от дохода семьи

Таблица 4 Автомобильные поездки в зависимости от семейного дохода

Назначение поездки	Годовой доход семьи, долл			
	Ниже 4 000	4 000—9 999	10 000—14 000	15 000 и более
<i>Процент от количества автомобильных поездок</i>				
Для «заработков на жизнь»	29,0	37,0	37,9	36,2
По семейным делам	34,9	30,8	30,2	30,4
По гражданским, образовательным и религиозным делам	7,8	8,6	10,5	10,2
Общественные и развлекательные	27,0	22,8	20,2	21,6
Прочие	1,4	0,9	1,2	1,6
Всего	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>Процент от общего пробега автомобилей</i>				
Для «заработков на жизнь»	31,0	39,6	44,0	47,4
По семейным делам	27,1	20,0	18,0	17,0
По гражданским, образовательным и религиозным делам	4,4	4,9	5,3	5,5
Общественные и развлекательные	35,7	34,2	31,5	28,9
Прочие	1,8	1,3	1,2	1,2
Всего	100,0	100,0	100,0	100,0

Наибольший километраж приходится на возрастную группу от 30 до 34 лет (на 20% больше среднего показателя для всех возрастов). На возрастные группы от 25 до 59 лет приходится километраж, превосходящий средний показатель для всех возрастных групп. Наименьший километраж приходится на самых молодых и самых пожилых водителей.

Стоимостные факторы, оказывающие влияние на автомобильные поездки, представляют больший интерес, чем влияние доходов и демографических факторов, поскольку эти влияния на се-

Таблица 5 Зависимость автомобильных поездок от возраста водителей, 1969—1970 гг.

Возрастная группа (год)	Средний годовой пробег в километрах на водителя	Доля от общего пробега автомобилей, %	Доля профессиональных водителей, %	Возрастная группа (год)	Средний годовой пробег в километрах на водителя	Доля от общего пробега автомобилей, %	Доля профессиональных водителей, %
16—19	7 454	4,6	9,0	50—54	15 200	8,8	8,2
20—24	13 290	12,6	13,1	55—59	14 495	7,1	6,8
25—29	15 791	13,0	11,3	60—64	13 052	5,0	5,4
30—34	16 531	11,3	9,3	65—69	9 413	2,4	3,7
35—39	15 894	10,5	9,1	70 и старше	7 472	2,5	4,7
40—44	15 821	11,1	9,7	Все возрасты	13 974	100,0	100,0
45—49	15 889	11,1	9,7				

Таблица 6 Цена на бензин и стоимость топлива на километр пробега в 1950—1974 гг.

Год	Номинальная цена на бензин, долл /л	Реальная цена на бензин с учетом уровня 1967 г., долл /л	Реальная стоимость бензина на километр пробега, долл /км	Индекс реальной стоимости бензина на километр пробега (1967 г. = 100)	Год	Номинальная цена на бензин, долл /л	Реальная цена на бензин с учетом уровня 1967 г., долл /л	Реальная стоимость бензина на километр пробега, долл /км	Индекс реальной стоимости бензина на километр пробега (1967 г. = 100)
1950	0,0707	0,0981	0,0154	1,042	1963	0,0804	0,0876	0,0145	0,979
1951	0,0717	0,0922	0,0149	0,979	1964	0,0802	0,0863	0,0142	0,962
1952	0,0728	0,0916	0,0147	0,992	1965	0,0823	0,0870	0,0145	0,983
1953	0,0758	0,0946	0,0152	1,025	1966	0,0847	0,0872	0,0147	0,992
1954	0,0767	0,0953	0,0154	1,042	1967	0,0876	0,0876	0,0148	1,000
1955	0,0768	0,0958	0,0155	1,050	1968	0,0890	0,0855	0,0146	0,987
1956	0,0791	0,0971	0,0159	1,076	1969	0,0919	0,0837	0,0145	0,979
1957	0,0818	0,0970	0,0158	1,071	1970	0,0943	0,0811	0,0140	0,950
1958	0,0803	0,0927	0,0152	1,029	1971	0,0962	0,0793	0,0137	0,929
1959	0,0805	0,0923	0,0152	1,025	1972	0,0954	0,0762	0,0133	0,899
1960	0,0822	0,0927	0,0153	1,034	1973	0,1026	0,0771	0,0139	0,937
1961	0,0813	0,0907	0,0149	1,054	1974	0,1385	0,0937	0,0168*	1,139*
1962	0,0809	0,0893	0,0146	0,987					

* С учетом средней топливной экономичности машин в автомобильном парке.
* Для средней топливной экономичности машин в автомобильном парке 1973 г.

годняшний день подвергаются быстрым изменениям. Поэтому несмотря на то, что для определения километража при составлении прогноза потребности в топливе использовались семейные и демографические данные, наибольшее внимание было уделено влиянию на автомобильные поездки стоимостных факторов.

Стоимостный фактор, влияющий на автомобильные поездки, определяется ценой бензина и к п д по топливу используемого автомобиля. С точки зрения километража изменение цены топлива будет оказывать на стоимость эксплуатации автомобиля непосредственное влияние, которое с течением времени по мере того, как покупатели будут приобретать автомобили с более высоким к п д по топливу, будет стираться. Однако изменение цены на бензин скажется не так быстро и значение этого изменения будет усиливаться по мере того, как покупатели начнут приобретать автомобили с более высоким к п д по топливу.

Цена на бензин с 1950 по 1970 г. (в реальных показателях) снижалась, при этом также снижалась средняя топливная экономичность в автомобильном парке. В результате этого реальная стоимость автомобильных поездок в течение этого периода сохранялась примерно постоянной, но снижалась в период с 1967 по 1972 г. Эти сведения приведены в табл. 6. В течение 1973 г. указанная тенденция начала меняться на обратную, и в 1974 г. поворот в основном завершился. Но часто не замечают, что в 1974 г. реальная цена бензина незначительно отличалась от цен 50-х годов. Однако вследствие непрерывного снижения топливной

Таблица 7. Средняя топливная экономичность автомобильного парка и новых автомобилей, км/л

Год	Средняя топливная экономичность автомобильного парка за календарный год, км/л	Топливная экономичность автомобилей (моделей соответствующих лет), км/л	Год	Средняя топливная экономичность автомобильного парка за календарный год, км/л	Топливная экономичность автомобилей (моделей соответствующих лет), км/л
1950	6,35	—	1962	6,11	5,93
1951	6,37	—	1963	6,06	5,36
1952	6,24	—	1964	6,06	5,73
1953	6,25	—	1965	5,98	5,52
1954	6,20	—	1966	5,95	5,50
1955	6,18	—	1967	5,92	5,47
1956	6,10	—	1968	5,86	5,29
1957	6,12	5,81	1969	5,79	5,19
1958	6,08	5,98	1970	5,77	5,32
1959	6,08	5,98	1971	5,77	5,19
1960	6,07	5,68	1972	5,73	5,11
1961	6,11	5,76	1973	5,57	4,96

Примечание. Данные 1957—1964 гг. учитывают также поездки мотоциклов.

экономичности вплоть до 1973 г. (табл. 7) стоимость среднего пробега 1974 г. была самой высокой за весь период.

Конечное влияние демографических, экономических и стоимостных факторов на расход бензина с 1950 по 1973 г. представлено в табл. 8. Они свидетельствуют о значительном увеличении расхода бензина с 92 002,5 млн. л в 1950 г. до 293 813,5 млн. л в 1973 г. В течение 1975 г. в стране удалось в основном сохранить потребление бензина на уровне 1973 г., т. е. прекратить непрерывное увеличение потребления в предшествующий период. Как видно из прогнозов, мы должны в конечном счете иметь возможность снизить потребление бензина путем повышения топливной экономичности автомобильного парка. Однако это не означает значительного снижения автомобильных поездок, так как за счет повышения топливной экономичности автомобильного парка стоимость поездок останется на традиционном уровне.

Структура модели. В ходе исследований оценены четыре основных составляющих, которые входят в модель: доли разных классов новых автомобилей при их сбыте, объем сбыта новых автомобилей, объем списания автомобилей в лом, километраж. Ниже приводится описание зависимости между этими составляющими.

Средневзвешенные характеристики при сбыте новых автомобилей определялись в моделях долями с учетом характеристики каждого рыночного класса автомобилей (малых, средних и больших)*, имевшихся в рассматриваемый год. Эти характеристики

* К малым автомобилям относятся как малолитражные, так и промежуточно класса между малолитражными и средними с рабочим объемом до 1,8 л, под большими понимаются автомобили с числом мест более шести.

Таблица 8. Потребление автомобильного бензина в стране в 1950—1973 гг.

Год	Потребление, млн. л	Год	Потребление, млн. л
1950	92 002	1962	165 688
1951	99 020	1963	171 271
1952	105 872	1964	180 057
1953	112 095	1965	190 046
1954	117 023	1966	201 455
1955	126 990	1967	208 220
1956	133 721	1968	221 112
1957	139 183	1969	235 921
1958	144 202	1970	248 503
1959	151 625	1971	261 994
1960	155 838	1972	276 787
1961	159 109	1973	293 814

Примечание. В потреблении 1957—1964 гг. учтено потребление бензина мотоциклами

включают: топливную экономичность, эксплуатационные расходы и покупательную стоимость. Для получения общей оценки по каждому году в формуле (см. ниже) используются средневзвешенные характеристики при сбыте (с общественно-экономическими прогнозами). Кроме того, для оценки списания в лом автомобилей каждого класса использовались данные о ценах на новые автомобили. Комбинация этих трех характеристик (с общественно-экономическими прогнозами) использована для оценки пробега автомобилей, а получающиеся таким образом прогнозы введены в парковую модель, с помощью которой определялся прогноз потребности в топливе для каждого года при наличии исходных данных.

Формула оценки доли автомобилей каждого класса. Первая проблема, которая возникает при разработке модели доли автомобилей каждого класса при их сбыте, заключается в нахождении наиболее подходящей системы классификации автомобилей. Поскольку данные, которыми мы располагали для этого исследования, включали сведения с 1963 по 1973 г., трудно было найти реальную однородную схему классификации. При использовании от шести до десяти взаимозависимых формул оценок возникает несколько степеней свободы, что соответствует сведениям за 11 лет.

Этим вызывается необходимость установить сводную зависимость цен между рыночными классами автомобилей в каждой формуле оценки, вследствие чего увеличивается количество параметров.

В результате исследований в основу классификации положена масса, и в зависимости от нее автомобили разделены на три рыночных класса:

Малые	менее 1385 кг
Средние	1385—1590 »
Большие	более 1590 »

Эта классификация дала возможность получать стабильные временные ряды наблюдений, с помощью которых можно было оценивать параметры.

В результате преобразований получена следующая вероятностная модель

$$S_t = \frac{1}{1 + e^{-[-4,1749 - 1,8660(x_t^S) + 3,502(x_t^M) + 5,6428(s_{t-1})]}};$$

$$M_t = \frac{1}{1 + e^{-[-4,1749 - 2,0765(x_t^M) + 3,5450(x_t^S) + 0,2589(x_t^L) + 5,6428(M_{t-1})]}};$$

$$L_t = \frac{1}{1 + e^{-[-4,1749 - 0,4299(x_t^L) + 1,8117(x_t^M) + 5,6428(L_{t-1})]}};$$

где S_t, M_t, L_t — рыночная доля автомобилей малого, среднего и большого класса в t -м году.

x_t^S, x_t^M, x_t^L — индекс реальной обобщенной цены автомобилей малого, среднего и большого классов соответственно, отнесенный к такому же индексу для новых автомобилей в t -м году (1967 г. — 1)

Формула оценки объема сбыта новых автомобилей Структура модели, выбранной для оценки объема сбыта новых автомобилей, основана на вычислении краткосрочных запасов Эта методика была разработана Г. Чоу [5], Нерловым [6], Хамбургером [7] и др. Желательный уровень (или заданный уровень) владения автомобилями установлен в виде нелинейной функции от семейного дохода Интервал между желательным уровнем и оценкой существующего уровня (полученного с помощью модели списания автомобилей в лом, автомобильного парка и сбыта автомобилей за прошлый год) соответствует потребностям в приобретении новых автомобилей. Для получения оценки сбыта новых автомобилей этот интервал объединяется со стоимостной характеристикой новых автомобилей Интервал не является определенной величиной Он скорее является функцией других факторов (семейных доходов, количества семей и количества безработных) и зависит от объема сбыта новых автомобилей, их цен, определяя вместе с этими факторами потребности в новых автомобилях

Все стоимостные характеристики новых автомобилей выражены в «обобщенной цене», которая включает начальную покупательную цену и снижение ожидаемых эксплуатационных расходов ко времени покупки С точки зрения модельных оценок снижение эксплуатационных расходов одновременно учитывало топливную экономичность и стоимость бензина Дифференцированные данные по эксплуатационным расходам не были получены Однако для целей прогнозирования любая оценка разности в эксплуатационных расходах может быть включена в «обобщенную цену» Для нашего прогнозирования основного варианта исполь-

зовались только ожидаемые изменения топливной экономичности и цены на топливо.

Конечный вид оценки объема сбыта новых автомобилей был следующим:

$$N_t = 286\,721,3 [O_t^* - (\text{Автомобили}_t - D_t)]^{0,2178} (X_t^*)^{-1,7039};$$

квадрат смешанной корреляции $R^2 = 0,7807$; стандартная ошибка оценки (СОО) = 0,0417; статистика Дурбина — Ватсона (ДВ) = 1,177; число степеней свободы (сс) = 11,

где N_t — суммарный годовой объем сбыта автомобилей в год t ,
 O_t^* — заданное количество владельцев автомобилями в году t ,
 Автомобили_t — количество автомобилей на складах к началу года t ,
 D_t — объем списания автомобилей в лом в течение года t ,
 X_t^* — индекс обобщенной цены (1967 г. = 1),

$$O_t^* = (\sum_i H_i P_{it}) R_t,$$

где P_{it} — доля семей в году t с доходом I ,
 H_i — количество владельцев автомобилей на семью с доходом I ,
 $H_i = 0,017886 I^{0,4743}$ ($R^2 = 0,983$),
 R_i — общее количество семей,
 I — доход семьи

Относительно высокая эластичность кажущейся цены 1,7 для сбыта новых автомобилей является обманчивой. Во-первых, это относится к переменной обобщенной цене, которая содержит как покупательную, так и эксплуатационную стоимость автомобиля Во-вторых, она не учитывает обратной связи переменной обобщенной цены X_t с «интервалом» через эндогенную оценку объема списания автомобилей в лом D_t , которая использует X_t также в качестве экзогенной переменной.

Таблица 9. Сдача в лом автомобилей в зависимости от времени их эксплуатации (M — год производства модели)

Календарный год	Доля автомобилей, сдаваемых в лом в течение года, %	Доля автомобилей, находящихся в эксплуатации на конец года, %	Календарный год	Доля автомобилей, сдаваемых в лом в течение года, %	Доля автомобилей, находящихся в эксплуатации на конец года, %
M	0,00	100,00	$M+9$	21,46	51,93
$M+1$	0,20	99,80	$M+10$	26,00	38,43
$M+2$	0,55	99,25	$M+11$	28,89	27,33
$M+3$	1,05	98,21	$M+12$	30,15	19,09
$M+4$	2,01	96,23	$M+13$	30,00	13,36
$M+5$	3,47	92,90	$M+14$	29,17	9,46
$M+6$	6,02	87,03	$M+15$	29,29	6,69
$M+7$	10,16	78,43	$M+16$	29,70	—
$M+8$	15,70	66,12	и более		

Примечание. Данные за календарный год определены путем линейной интерполяции на основании кумулятивного распределения оставшихся автомобилей

Формула оценки объема сдачи автомобилей в лом. Общие размеры объема сдачи автомобилей в лом в зависимости от времени относительно стабильны. Количество сдаваемых на лом автомобилей увеличивается до их срока службы, равного примерно 11 лет, а после этого остается постоянным (табл. 9). Важно определить влияние стоимости новых автомобилей на сдачу в лом подержанных. Это имеет большое значение для расчета экономии энергии в результате изменения политики, которая может предусмотреть увеличение цены на автомобили с низким к п. д. по топливу. Можно ожидать увеличения цен на новые автомобили с целью повышения ценности подержанных автомобилей и снижения уровня сдачи их в лом. Увеличение цены на автомобили только большего класса при сохранении или снижении цены на автомобили малого класса (что стимулируется) не окажет влияния на общие размеры списания в такой мере, как повышение цен на все автомобили. Однако повышение цен на новые автомобили окажет большое влияние на размеры сдачи в лом автомобилей по рыночным классам и в результате этого произойдут значительные изменения в энергетической эффективности автомобилей старых марок. Такие изменения могут оказать влияние на топливную экономичность автомобильного парка в целом.

Другим важным фактором, определяющим сдачу автомобилей в лом, являются общие экономические условия. Поскольку сбыт новых автомобилей частично определяется интервалом между желательным уровнем владения автомобилями, количеством автомобилей на складах в предыдущем году и сдачей автомобилей в лом, то любые общие экономические факторы, используемые для оценки сдачи автомобилей в лом, также оказывают влияние на потребность в новых автомобилях.

Экономические факторы оказывают влияние в первую очередь на сдачу в лом предельно устаревших автомобилей. Это отражено в модели оценки сдачи в лом старых автомобилей (прослуживших 8—9 лет). Ранняя сдача автомобилей в лом обычно не обусловлена общими экономическими факторами или ценой новых автомобилей, но даже резкие изменения экономических факторов и цен на новые автомобили обычно не стимулируют сдачу в лом сравнительно новых машин.

С помощью цен на новые автомобили и оценки уровня безработицы для определения объема сдачи автомобилей в лом получены следующие зависимости:

$$SPG_t t^{\leq} = 0,40675 - 0,078433 (P_n)_t - 0,015519 U_t, R^2 = 0,6587;$$

$$COO = 0,01544; DB = 1,9087; cc = 10,$$

где SPG_t — процент сдачи в лом автомобилей в возрасте 8 лет и более в году t ,
 $(P_n)_t$ — индекс реальной цены новых автомобилей в году t (1967 г = 1),
 U_t — доля безработных в году, t

Определенные таким образом изменения процента сдачи автомобилей в лом использовались индивидуально для каждого рыночного класса.

Формула для оценки пробега автомобилей. В формулу для оценки пробега автомобилей включены четыре важных составляющих: стоимость движения, доступность автомобиля, демографические условия и доступный доход.

Во многих моделях прогнозирования для определения количества или многих из этих составляющих использовались различные переменные. К наиболее важным из них относятся: пробег автомобилей за предыдущий год, население, количество семей, количество водителей, доход, цена бензина, топливная экономичность, стоимость одного километра пробега, индекс цен на товары и обслуживание, цена новых автомобилей, суммарные резервы автомобилей, безработица, надежность и нормы охраны окружающей среды. Безусловно, ни одна модель не включает всех этих переменных (обычно в каждой модели может быть лишь четыре или пять отдельных переменных). Для модели многие переменные могут оказаться лишними или частично лишними. Попытка включить каждую переменную вызовет при оценке сложные проблемы учета их взаимного влияния. После проверки нескольких из переменных в различных комбинациях было выбрано следующее уравнение, которое лучше всего учитывает четыре основных составляющих, влияющих на пробег автомобилей:

$$\frac{ГПА}{Семья} = -52979,8 + 15087 \log \frac{РД}{Семья} + 6337,7 \frac{Автомобили}{Семья} - 2204,24 СТ,$$

$$R^2 = 0,9767; COO = 257,235; DB = 0,4614; cc = 18,$$

где $\frac{ГПА}{Семья}$ — годовой пробег автомобилей в милях на семью,
 $\frac{РД}{Семья}$ — доход после уплаты налогов на семью (в долларах 1976 г);
 $\frac{Автомобили}{Семья}$ — общее количество автомобилей у семьи (по состоянию на 1-января каждого года),
 $СТ$ — индекс реальной стоимости топлива на милю (цена бензина с учетом средней топливной экономичности автомобильного парка, откорректированная по индексу цен на потребительские товары) (1967 г = 1)

Система уравнений модели. Ниже приводятся уравнения модели в виде взаимосвязанной системы. Уравнение 4 предназначено для определения цены подержанных автомобилей. Оно не рассматривалось прежде, поскольку непосредственно не относится к оценке расхода топлива. Это уравнение служит для определения влияния на доход семьи различных вариантов политики, оказывающих влияние на топливную экономичность новых автомобилей (цена новых автомобилей и располагаемый доход определяют цену подержанных автомобилей). Модель автомобильного парка, используемая для расчета расхода топлива, не показана. Эта модель не дает оценки и не отражает развития ав-

Таблица 10. Результаты, полученные на модели

Показатели	1976	1978	1980	1982	1984
<i>Цены на топливо</i>					
Общий объем сбыта автомобилей, млн. шт.	11,5	10,7	12,0	12,3	12,6
Доля автомобилей:					
малых	0,356	0,360	0,365	0,370	0,377
средних	0,158	0,160	0,162	0,164	0,167
больших	0,486	0,479	0,473	0,465	0,457
Автомобили, находящиеся в эксплуатации, млн. шт.	95,7	100,0	104,6	109	114
Число списанных автомобилей, млн. шт.	8,1	9,6	9,8	10,0	10,2
Пробег автомобилей, млрд. км/год	1714	1816	1925	2037	2154
Расход бензина, млн. м³/год	300	304	311	320	331
Средняя общая стоимость (включая эксплуатационные расходы), млн. долл.	5995	5982	5966	5949	5930
<i>Цены на топливо</i>					
Общий объем сбыта автомобилей, млн. шт.	11,3	10,3	11,2	11,2	11,2
Доля автомобилей:					
малых	0,356	0,361	0,367	0,375	0,383
средних	0,158	0,160	0,160	0,161	0,160
больших	0,486	0,479	0,473	0,465	0,456
Автомобили, находящиеся в эксплуатации, млн. шт.	95,5	99,0	101,9	104,4	106,7
Число списанных автомобилей, млн. шт.	8,1	9,6	9,7	10,0	10,1
Пробег автомобилей, млрд. км/год	1707	1793	1878	1959	2038
Расход бензина, млн. м³/год	299	301	304	308	314
Средняя общая стоимость (включая эксплуатационные расходы), млн. долл.	6071	6207	6340	6523	6701
<i>Цены на топливо</i>					
Общий объем сбыта автомобилей, млн. шт.	11,5	11,0	12,5	13,0	13,4
Доля автомобилей:					
малых	0,356	0,360	0,364	0,368	0,373
средних	0,156	0,161	0,163	0,167	0,170
больших	0,486	0,479	0,473	0,465	0,457
Автомобили, находящиеся в эксплуатации, млн. шт.	95,7	100,4	105,9	111,8	118
Число списанных автомобилей, млн. шт.	8,0	9,6	9,8	10,0	10,3
Пробег автомобилей, млрд. км/год	1714	1826	1951	2082	2219
Расход бензина, млн. м³/год	300	306	315	327	341
Средняя общая стоимость (включая эксплуатационные расходы), млн. долл.	5988	5893	5762	5652	5540

при различных ценах на топливо (по годам)

	1986	1988	1990	1992	1994	1996	1998	2000
<i>постоянные</i>								
13,1	13,6	14,1	14,6	15,1	15,7	16,2	16,8	
0,384	0,392	0,401	0,412	0,423	0,436	0,450	0,465	
0,169	0,171	0,173	0,175	0,177	0,180	0,182	0,184	
0,448	0,437	0,426	0,413	0,400	0,384	0,368	0,350	
118,7	123	127,4	132	136,7	141,6	146,7	151,9	
10,9	11,4	11,9	13,2	12,8	13,2	13,7	14,2	
2270	2387	2507	2532	2763	2899	3042	3191	
345	360	376	392	409	427	445	463	
5909	5884	5857	5927	5793	5756	5715	5670	
<i>увеличиваются</i>								
11,4	11,9	12,4	12,8	13,1	13,5	14,0	14,5	
0,394	0,406	0,418	0,432	0,448	0,465	0,482	0,501	
0,160	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,160	
0,446	0,435	0,422	0,408	0,393	0,376	0,358	0,339	
108,5	110,6	113,3	116,4	119,9	123,5	127,5	131,6	
10,5	10,8	11,0	11,1	11,3	11,6	12,0	12,4	
2120	2212	2312	2420	2535	2657	2787	2923	
322	333	345	359	373	388	403	419	
6778	6757	6731	6714	6692	6652	6595	6534	
<i>снижаются</i>								
13,8	14,2	14,7	15,4	16,0	16,6	17,2	17,8	
0,373	0,384	0,391	0,399	0,408	0,419	0,430	0,443	
0,174	0,178	0,181	0,185	0,189	0,193	0,197	0,201	
0,448	0,439	0,428	0,416	0,403	0,389	0,373	0,356	
123	128,8	133,6	138,4	143,6	149,0	154,5	160,3	
11,0	11,7	12,4	12,9	13,4	13,8	14,3	14,9	
2352	2475	2594	2729	2784	3006	3056	3311	
358	374	390	408	426	445	464	484	
5482	5477	5468	5444	5416	5386	5352	5316	

Характеристика модели

$$1) N_t = (286\,721,3) [O_t^* - (\text{Автомобили}_t - D_t)]^{0,2178} (X_t^*)^{-1,7039};$$

$$2a) S_t = \frac{1}{1 + e^{-[-4,1749 - 1,8660(X_t^S) + 3,5092(X_t^M) + 5,6428(S_{t-1})]}};$$

$$2b) M_t = \frac{1}{1 + e^{-[-4,1749 - 2,0765(X_t^M) + 2,5450(X_t^S + 0,2589(X_t^L) + 5,6428(M_{t-1}))]}};$$

$$2c) L_t = \frac{1}{1 + e^{-[-4,1749 - 0,4299(X_t^L) + 1,8117(X_t^M) + 5,6428(L_{t-1})]}};$$

$$3) SPG_t = 0,4068 - 0,0784(P_n)_t - 0,0155(U_t);$$

$$4) (P_n)_t = 2,765 \cdot 10^{-5} (X_t^*)^{2,1626} \frac{РД}{Семьи_t}^{1,1512};$$

$$5) \frac{ПAM}{Семьи} = -52979,8 + 15087 \log \frac{РД}{Семьи_t} - 2204,24 (СМП)_t + \\ + 6337,24 \frac{\text{Автомобили}}{Семьи_t};$$

N_t — количество новых автомобилей, проданных в году t ;

O_t^* — прогнозируемое количество автомобилей, находящихся в собственности в году t ;

Автомобили _{t} — фактическое количество автомобилей на складах на 1 января года t ;

D_t — количество автомобилей, сданных в лом в течение года t ;

X_t^* — индекс реальной, обобщенной цены новых автомобилей (1967 г. = 1);

S_t, M_t, L_t — рыночные доли малолитражных, среднего класса и больших автомобилей соответственно в году t ;

X_t^S, X_t^M, X_t^L — индекс реальной, обобщенной цены малолитражных, среднего класса и больших автомобилей относительно индекса всех новых автомобилей в году t (1967 г. = 1);

SPG_t — темпы списания в году t автомобилей в возрасте восьми лет и более;

$(P_n)_t$ — индекс реальной цены новых автомобилей в году t (1967 г. = 1);

$(P_u)_t$ — индекс реальных цен использованных автомобилей в году t ;

U_t — процент безработных в году t ;

РД — суммарный доход семьи в году t ;

ПAM — суммарный пробег автомобиля в милях в году t ;

СМП — индекс реальной парковой стоимости бензина на миллион пробега в году t (1967 г. = 1);

Семьи — общее количество семей, владельцев автомобилей в году t .

томобильного парка, а является скорее тождеством, которое вытекает из оценки переменных и традиционных данных.

Прогнозы потребления топлива и смежные переменные. Для получения основного варианта прогноза потребления топлива использовалась модель, описанная выше, и полученные результаты приводятся в табл. 10. Возможны три варианта прогноза. В одном варианте предусматриваются постоянные (реальные) цены на бензин в течение всего прогнозируемого периода. В двух других вариантах, учитывая неопределенность.

Таблица 11. Экзогенные переменные, вводимые в модель

год	Цена на топливо ¹ долл./л			Количество семей ²	Доход ³ семьи, долл. в год	Безработные	Топливная экономичность ⁴ , км/л			Цена на легковые автомобили, долл. ⁵		
	постоянная	повышающаяся ²	понижающаяся ²				небольшая	средняя	большая	низкая	средняя	высокая
1975	0,161	0,161	0,161	69,9	10 074	8,9	9,5	6,6	5,3	3 000	3 598	4 654
1976	0,161	0,170	0,160	71,01	10 275	7,5	9,7	6,7	5,5	3 000	3 598	4 654
1978	0,161	0,170	0,154	73,3	10 691	4,7	10,0	7,0	5,8	3 000	3 598	4 654
1980	0,161	0,190	0,145	75,7	11 122	4,7	10,3	7,4	6,2	3 000	3 598	4 654
1982	0,161	0,206	0,138	78,1	11 572	4,7	10,6	7,7	6,5	3 000	3 598	4 654
1984	0,161	0,222	0,131	80,7	12 039	4,7	10,9	8,0	6,8	3 000	3 598	4 654
1986	0,161	0,230	0,127	83,4	12 526	4,7	11,1	8,2	6,9	3 000	3 598	4 654
1988	0,161	0,231	0,128	86,1	13 032	4,7	11,1	8,2	6,9	3 000	3 598	4 654
1990	0,161	0,232	0,129	88,9	13 558	4,7	11,1	8,2	6,9	3 000	3 598	4 654
1992	0,161	0,235	0,129	91,9	14 106	4,7	11,1	8,2	6,9	3 000	3 598	4 654
1994	0,161	0,237	0,129	94,91	14 676	4,7	11,1	8,2	6,9	3 000	3 598	4 654
1996	0,161	0,238	0,129	98,0	15 269	4,7	11,1	8,2	6,9	3 000	3 598	4 654
1998	0,161	0,238	0,129	101,2	15 886	4,7	11,1	8,2	6,9	3 000	3 598	4 654
2000	0,161	0,238	0,129	104,5	16 527	4,7	11,1	8,2	6,9	3 000	3 598	4 654

¹ В долларах 1974 г.

² Повышение цен определялось исходя из недостаточных ресурсов нефти и природного газа в стране и высоких цен на импортную нефть (долл. за м³ в 1980 г.).

³ Снижение цен определялось исходя из доступности отечественной нефти и природного газа и цен на импортную нефть (долл. за м³).
⁴ Сведения относительно количества семей составлены на основании переписи и прогнозов роста населения (доклады о переписи населения, серия Р-25, № 541) и переписи для определения факторов, влияющих на рост семьи (доклады о переписи населения).

⁵ В долларах 1967 г. (предусматривается 2%-ный темп роста).

⁶ Предусматривается переход от современного уровня безработицы к планируемому уровню безработицы в 1978 г. — 4,7%. (для данной модели авторы, начиная с 1978 г., приняли уровень безработицы равным 4,7%. В действительности к 1982 г. этот уровень не был достигнут и в настоящее время составляет около 10% — прим. ред.).

⁷ За счет ожидаемого усовершенствования конструкции двигателя и снижения его массы 40%-ное усовершенствование можно ожидать в 1980 г. (по сравнению с 1975 г.) только при условии увеличения сбита. Если же рынок не изменится, то 40%-ное усовершенствование можно ожидать лишь в 1985 г.

⁸ В долларах 1975 г.

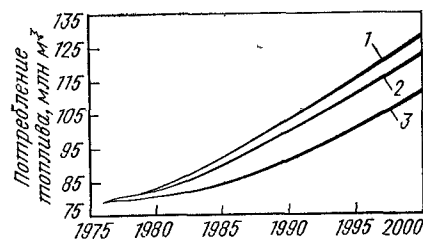


Рис. 4 Прогнозы потребления топлива при снижении (1), сохранении (2) и увеличении (3) цены на топливо

зать, что это влияние полностью отсутствует, но при долгосрочном прогнозировании нет возможности его учесть, так как оно слишком незначительно, чтобы его можно было количественно оценить и использовать в нужных целях.

Модель, описываемая системой уравнений, использовалась для установления связи между прогнозами населения, доходом, характеристикой автомобиля, экономическими условиями и стоимостью топлива, оценкой потребности в автомобильных поездках и характеристикой топливной экономичности будущего автомобильного парка. На основании прогнозов, отражающих нормальное экономическое развитие и относительно стабильные цены на топливо, установлено, что автомобильные поездки и расход топлива до 2000 г. будут значительно увеличиваться. Если при этом цены на бензин будут снижаться, то потребление бензина для автомобильных поездок к 2000 г. возрастет по сравнению с 1976 г. на 85%. А если цены на бензин будут повышаться, то потребление бензина за этот период увеличится в меньшей степени на 40% по сравнению с 1976 г.

Эти прогнозы могут быть значительно изменены, если появятся автомобили с более высоким к. п. д. по топливу. Принятые в работе предпосылки были довольно консервативными. Снижения расхода топлива можно также добиться при соответствующем техническом прогрессе за счет совершенствования конструкции двигателя и шасси.

ОБСУЖДЕНИЕ

Дж. В. Блэкмен (корпорация «Крайслер»). Хотелось бы попросить Вас повторить приведенные Вами только что показатели среднего пробега для автомобильного парка на литр бензина. Полагаю, что под парком Вы понимаете парк легковых автомобилей страны, находящийся в настоящее время в эксплуатации?

Хемфилл Да, это так. Согласно нашей оценке пробег на литр бензина в 1976 г. был равен 5,7 км. Для 1980 г. соответствующий показатель предполагается равным 6,1 км и для 1985 г. 7,4 км.

предусматривается возможное увеличение и снижение цен на бензин (рис. 4).

Данные для ввода в модель были получены из вторичных источников. Варианты данных приводятся в табл. 11.

Выводы потребности в автомобильных поездках отражают закономерности демографического и экономического развития. На эти закономерности почти не влияет доступность других видов транспорта. Нельзя ска-

Вопрос неизвестного участника. Вы говорили о реальной цене. Включает ли она стоимость разработки?

Хемфилл. Да.

Дж. Л. Бэймен (филиал «Кадиллак мотор дивижн» фирмы «Дженерал моторс»). Хотелось бы знать, как учитывалось и учитывалось ли вообще соблюдение норм по охране окружающей среды от загрязнения или снижение загрязнения окружающей среды в Ваших моделях топливной экономичности?

Хемфилл. Я поднимал этот вопрос довольно безуспешно в течение шести месяцев. В вопросе о влиянии, которое могут оказать различные нормы ограничения загрязнения окружающей среды на топливную экономичность, нет абсолютно никакого согласия между специалистами. Мы получили наши собственные оценки ограничения загрязнения окружающей среды и мы считаем правильным законопроект, разработанный подкомитетом Роджерса. На основании работ по топливной экономичности мы получили некоторые соображения о том, что может быть сделано в этом направлении. Эти задачи могут быть включены в модель. Сейчас модель является достаточно гибкой. В нее можно ввести различные программы и получить соответственно различные ответы. Для того чтобы учесть факторы, касающиеся загрязнения окружающей среды, сама модель не нуждается в какой-либо внутренней перестройке. Этот вопрос настолько запутан и в нем так много противоречий, что мы вынуждены были ввести этот фактор в модель для пропорции.

С. С. Пеннер (Калифорнийский университет, Сан-Диего). Вы упомянули о том, что скоростные транзитные сообщения не оказывают существенного влияния на владение индивидуальными автомобилями. Если я не ошибаюсь, Вы говорили о разнице в 14%, не считая г. Нью-Йорка.

Достаточно ли достоверны Ваши данные, чтобы утверждать, что в последнее время в этой структуре произошли или не произошли изменения?

Хемфилл. В последние годы наблюдалось некоторое волнение вокруг вопроса о массовых межгородских сообщениях. Начиная с 1946 г. межгородские сообщения непрерывно сокращались, считая на пассажир-поездка-километры. Это снижение было медленным, но тем не менее оно было. Во время эмбарго на нефть положение изменилось. Сейчас в этом вопросе много неясностей. Сведения от месяца к месяцу резко меняются, но все сведения, которыми мы располагаем, свидетельствуют о том, что наличие или отсутствие межгородских пассажирских сообщений не оказывает подавляющего влияния на владение автомобилями. Трудности правильных выводов в этом вопросе заключаются в том, что очень мало пунктов, в которых массовые межгородские пассажирские перевозки были бы настолько организованы, чтобы служить заменой индивидуального транспорта. Вообще говоря, мы располагаем сведениями только о шести городах, которые были упомянуты в докладе, и исходя из этих данных у нас не возникает особых

сомнений. Неопределенность в массовых межгородских пассажирских перевозках заключается в том, что у нас нет никаких сведений о том, какими они будут в будущем. Поэтому пытаться предсказать потребность в новых легковых автомобилях, основываясь на совершенно неясных проектах относительно массовых пассажирских перевозок, было бы довольно опрометчиво.

Дж. В. Дэвисон (компания «Филлипс петролеум компани»), В своих комментариях Вы указывали, что в Вашем основном варианте цена топлива была принята постоянной. Может ли Ваша модель учесть изменение цены топлива?

Хемфилл. Да, может. Наша модель была бы малополезной, если бы она не могла учесть этого. В ЭВМ можно ввести любой вариант, будь то повышение или понижение цены, и получить в результате ответ, каким образом это изменение цены на бензин скажется на соотношении классов продаваемых автомобилей и на топливной экономичности автомобильного парка.

У. Т. Лин (компания «Каминс Энджин»). Пытались ли Вы проверить Вашу модель для прогнозирования современных условий на основании данных за прошлые годы?

Хемфилл. Да. Именно таким образом были получены различные коэффициенты, входящие в уравнения.

У. Т. Лин. Какими годами Вы оперировали?

Хемфилл. В некоторых случаях с 1950 г., в других с 1960 г. Это зависело от того, в какой мере мы располагали надежными и солидными временными рядами в данной конкретной области.

Р. Е. Джеймс (корпорация «Дженерал моторс корпорейшн»). Использовали ли Вы Вашу модель для оценки влияния на потребление бензина произвольного изменения программы автомобильной промышленности, направленной на повышение топливной экономичности к 1980 г.? Второй вопрос. Оценивали ли Вы действие двух законопроектов, представленных на утверждение Сенату, в которых требуется довести удельный пробег на автомобилях к 1985 г. до 11,9 км/л?

Хемфилл. Ответ на первый вопрос. Мы производили много оценок, учитывающих повышение топливной экономичности на 40% к 1980 г., и я думаю, что мы получили некоторые оценки, которые позволяют в зависимости от Ваших предположений относительно изменения цены к 1985 г. сэкономить бензина примерно от 63 600 до 95 400 м³/сут. Что же касается влияния установления норм на пробег автомобилей 11,9 км/л, то здесь мы встретились с некоторыми реальными трудностями. В модель можно ввести пробег в километрах на литр для нового автомобильного парка, разбитого на классы автомобилей, и предусмотреть пробег 11,9 км/л. После этого надо сделать некоторые допущения относительно последствий, к которым может привести изменение цен. В результате всех этих действий получится ряд рыночных долей. Трудность заключается в том, что все это приходится делать путем экстраполяции и аналогично тому, о чем мы говорили при рассмотрении вопроса загрязнения окружающей среды. Данный

прогноз в большой степени зависит от инженерного решения вопроса и выходит за пределы моей компетенции. Я не убежден, что на основании всего того, что мне известно, можно добиться к 1985 г. показателя 11,9 км/л, имея в виду государственные нормы на загрязнение окружающей среды, если, конечно, весь парк легковых автомобилей не будет состоять на 100% из микро- и малолитражных автомобилей, а этого, по моему мнению, не произойдет. Таким образом, если ввести в модель этот показатель, то получится большая экономия топлива. Но это в будущем.

Дж. М. Колуччи (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Каким образом Вы учитывали изменения в процессе сдачи автомобилей в лом в связи со сдвигами в экономических условиях? Нам известно, что в периоды спада снижается сбыт новых автомобилей и старые автомобили эксплуатируются значительно дольше. Как Вы учитывали это?

Хемфилл. Мы пользовались двумя переменными, которые, как нам кажется, наилучшим образом отражают процесс сдачи автомобилей в лом. Мы пользовались ценой на новые автомобили и процентом безработицы. При составлении наших прогнозов на будущее мы пользовались показателем роста валового национального продукта 3,5% (согласно оценке Поллиана) и снижением уровня безработицы к 1978 г. до 4,7% (см. примечание редактора к табл. 11) и сохранением этого уровня безработицы в последующие годы. При изменении этих параметров изменится и объем сдачи автомобилей в лом. Мне кажется, что это является одним или двумя преимуществами настоящего метода по сравнению с предыдущими моделями.

ПРОГНОЗЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ США ЭНЕРГИЕЙ ДО 1990 г.

С. Дж. БОБЬЕН

Компания «Шелл ойл», Хьюстон, штат Техас, США

Каждый сектор энергетического рынка стремится видеть себя в центре событий, отводя другим секторам, потребляющим энергию, второстепенную роль. В действительности же все секторы очень тесно связаны между собой, а количество и типы топлив, доступных для одного сектора, в большой степени зависят от потребностей и относительной важности каждого из остальных секторов. Поэтому для того, чтобы сделать заслуживающие доверия прогнозы относительно топлива, необходимо определить общий энергетический баланс, например, в транспортном секторе. После принятия такой концепции становится очевидным, что возникает еще более широкий круг вопросов, который необходимо решить для оценки общественных, политических и экономических факторов, влияющих на размеры потребления топлива. В данном докладе рассматриваются факторы, от которых зависит оценка общего энергетического баланса США до 1990 г., на основании независимых общественных, политических и экономических исследований.

Полученные результаты приводятся в виде общей потребности в энергии в секторе и общих ресурсов энергии по первичным энергоисточникам. В результате проведенного исследования было установлено интересное обстоятельство,

закрывающееся в том, что, несмотря на снижение общего роста потребления энергии до 1990 г., стране потребуется дополнительно 3021 тыс. м³/сут нефтяного эквивалента¹. Половина этой потребности будет удовлетворяться за счет ядерной энергии, а остальное — за счет угля и нефти. Рассматриваются также вопросы, касающиеся ресурсов и потребности в каждом из основных источников топлива. Установлено, что хотя отечественные ресурсы (в том числе арктические) всех топлив, кроме природного газа, увеличиваются, дефицит между потребностью и ресурсами будет продолжать возрастать до 1985 г. и в течение этого периода покрываться только за счет импорта нефти. Приводится также анализ потребления транспортным сектором различных топлив с разбивкой на виды транспортных средств — легковые автомобили, грузовые автомобили, авиация и т. п. В этой связи было установлено, что в прогнозируемый период потребность в топливе будет увеличиваться на 1% в год, в то время как в прошлые годы она увеличивалась на 5% в год. Это снижение в значительной мере объясняется уменьшением потребности в бензине для легкового автомобильного транспорта.

Один из выводов заключается в том, что возможность США сократить потребность в энергии за счет обычных мер экономии является недостаточной компенсацией растущего дефицита собственных энергетических ресурсов. Для того чтобы значительно сократить импорт нефти до 1985 г., потребуется осуществление национальной программы, которая бы изменила в стране структуру потребления топлива и образ жизни.

Введение. В США проводится интенсивная работа по оценке текущих и долгосрочных возможностей обеспечения страны энергией. Эта оценка в большой степени зависит от действий США, предпринятых или предпринимаемых на мировой политической арене. В настоящее время это имеет гораздо большее значение, чем когда-либо в прошлом.

Прогнозирование в такой более, чем неопределенной обстановке характеризует скорее деятельность людей, чем рынков.

Переходный период. Энергетические секторы как в США, так и в мире в настоящее время находятся в переходном периоде. Изменения как ожидаемые, так и неожиданные оказали влияние на стоимость энергии и способы ее применения в различных сферах.

Нефтяное эмбарго 1973—1974 гг. и повышение цен на нефть организацией стран, экспортирующих нефть (ОПЕК), вызвали повышение цен на нефть в мире. Повышенные цены на нефть и эмбарго на вывоз нефти пришлось на ту пору, когда зависимость США от импортной нефти стала увеличиваться.

Потребление энергии в США увеличивалось во всех секторах экономики и в 1974 г. достигло 5565 тыс. м³/сут нефтяного эквивалента. В то же время отечественное производство энергии составило в 1970—1973 гг. примерно 4611 тыс. м³/сут нефтяного эквивалента. Разница между этими двумя значениями, составлявшая энергетический дефицит, восполнялась за счет импорта. В 1970 г. в США импортировано немногим более одной четверти, а в 1974 г. импорт превысил одну треть потреблявшейся в стране нефти.

Одной из главных причин энергетического дефицита является традиционная цена на энергию. В течение целого ряда лет до эм-

¹ Единице нефтяного эквивалента соответствует количество топлива, выделяющего при своем сгорании столько тепла, сколько выделяется при сгорании единицы объема или единицы массы нефти, т. е. 10^7 ккал/т или $7,58 \cdot 10^6$ ккал/м³.

барго на нефть цены на энергию в США по сравнению с ценами на другие товары росли не столь интенсивно. Это стимулировало потребление избыточного количества энергии. Кроме того, в связи с правительственным регулированием цен на природный газ и низкими мировыми ценами на другие виды топлива потребности США в энергии удовлетворялись за счет дешевой энергии. Образовавшийся энергетический дефицит наиболее экономично удовлетворялся импортом зарубежной нефти.

Экономические просчеты, бездействие правительства страны в области энергетической политики, тяжесть относительно охраны окружающей среды и общее чувство неуверенности привели к затажке претворения в жизнь важнейших энергетических проектов. К проектам, встретившим препятствия на пути своего осуществления, относятся трансалаяскинский нефтепровод и выдача лицензий на разведку нефти и природного газа в районах континентального шельфа. Еще одним примером такого рода является приостановка осенью 1974 г. реализации проекта компании «Колони дивелопмент» по разработке горючих сланцев в штате Колорадо из-за повышения его стоимости и неопределенности в энергетической политике США. Были преданы забвению надежды американцев на разработку крупных запасов горючих сланцев в западных районах страны.

Пока в США имели место проволочки при решении энергетических проблем, добыча нефти в стране достигла своего максимума в 1970 г., а природного газа — в 1973 г. Добыча угля в стране, которая начала значительно снижаться в 50-е годы, лишь недавно вновь достигла 600 млн. т. в год — уровня, на котором она была в 40-х годах.

В итоге потребность США в энергии непрерывно росла, а производство энергии в последние годы не увеличилось. В результате возрос ее импорт, который ослабил США с точки зрения национальной и экономической безопасности и увеличил зависимость от зарубежных стран.

В США проводится интенсивная работа по критической оценке своих текущих и будущих возможностей обеспечения энергией. Решения, которые будут приняты после обсуждения этих проблем, должны исходить из оценки наших технологических возможностей. Но такое же важное значение будут иметь оценки институтов, исследующих экономическую и социальную конъюнктуру, в которой происходит технологический процесс.

Предпосылки и прогнозы. Компания «Шелл ойл» подготовила прогнозы энергетических ресурсов и потребностей энергии США на много лет вперед. По мере роста интереса к энергии, компания «Шелл» начала разрабатывать прогнозы для различных групп населения. Начиная с 1970 г. компания «Шелл» предоставляет свои прогнозы Федеральному правительству и правительствам штатов, а также гражданским организациям.

В конце 1975 г. она разработала прогноз на 1980—1990 гг. В нем рассматриваются не только потенциальные возможности

технологического прогресса, но приводится также оценка основных экономических и социальных проблем, влияющих на обеспечение энергией. С этой целью была разработана модель, позволяющая одинаково и последовательно оценивать проблемы, возникающие в процессе разработки прогнозов энергетических ресурсов и потребностей. Не все элементы этой модели могут быть представлены в настоящем докладе, но ниже рассматриваются некоторые наиболее важные ее компоненты.

Прогноз отражает такие предпосылки, как слабость экономики и безработица в течение большей части 1975 г и переход к постепенному циклическому восстановлению в 1976 г. Экономический подъем предполагается после ликвидации запасов и увеличения реальных доходов в связи с уменьшением инфляции. Как видно из рис. 1, за этим периодом предполагается период устойчивого экономического роста по мере того, как будет сужаться интервал между фактическим уровнем производства и потенциально возможным объемом производства при полной занятости. Потенциальные возможности производства при полной занятости в связи с трудностями спада не будут достигнуты до начала 80-х годов. Компания «Шелл» считает, что потенциальное экономическое развитие в будущем будет несколько ниже, чем в недавнем прошлом, из-за снижения роста населения, более жестких норм охраны окружающей среды и более высоких цен на энергию.

Далее предполагается, что инфляция в последующие несколько лет станет значительно снижаться (рис. 2) благодаря сильному экономическому спаду и вероятности того, что не будет действовать ряд факторов, которые в недавнем прошлом способствовали ускорению инфляции. К этим факторам относятся мировое перепроизводство товаров, мировое снижение производства продовольствия, снижение валютного курса доллара и многократное

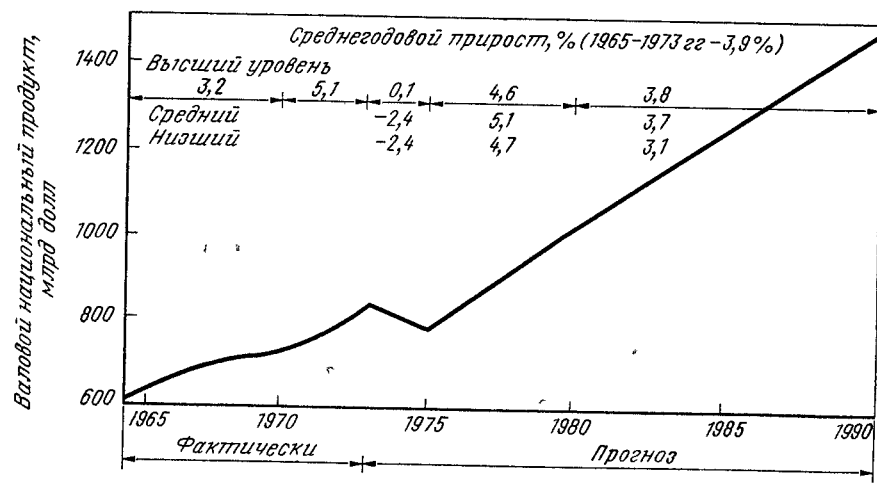


Рис 1 Реальный валовой национальный продукт США в ценах 1958 г

повышение цены на нефть. Опыт последнего времени, однако, окажет некоторое дополнительное действие на уровень инфляции в остальной период.

Поэтому мы планируем для остальной части периода значительно более высокий уровень инфляции, чем средние послевоенные показатели.

Политическая обстановка в ближайшее время, по-видимому, заставит принимать серьезные меры, предусматривающие снижение зависимости от зарубежной нефти путем уменьшения ее потребления, а также меры, значительно ограничивающие импорт нефти. Следовательно, действия правительства ограничены определенными рамками.

В течение ближайшего будущего ожидается, что интерес общественности к охране окружающей среды останется на высоком уровне, однако конгресс страны выражает готовность пойти на некоторый компромисс в отношении норм ограничения загрязнения атмосферы и выдачи лицензий на сдачу в аренду участков континентального шельфа. По мере восстановления экономики страны в 1977 и 1978 гг. вызванное этим увеличение импорта нефти, а также интерес общественности к охране окружающей среды, вероятно, приведут к необходимости снятия некоторых барьеров, ограничивающих увеличение производства отечественной энергии.

Законодательная деятельность, очевидно, будет направлена на смягчение ограничивающих норм по сооружению ядерных установок, на дальнейшее снятие барьеров с эксплуатации перспективных месторождений горючих сланцев и стимулирование производства синтетических углеводородов на базе горючих сланцев и угля. В этот же период времени предусматривается осуществление серьезных мер для охраны окружающей среды от загрязнения по линии федеральных законов, причем наиболее жесткие ограничения будут введены в западных штатах страны.

Наряду с ростом цен, с которым столкнется нефтяная промышленность, ей придется выдержать и бремя увеличивающихся налогов, что будет тормозить накопление капитала и приведет к ограничению возможности капиталовложений в энергетические объекты.

Надо полагать, что цены на нефть и природный газ в будущем возрастут. Это должно служить значительным стимулом для капиталовложений в сферу экономики энергии и бережливого использования ее потребителями. Таким образом, в следующем десятилетии в США ожидается снижение потребления энергии, но в абсолютных показателях потребление энергии будет увеличиваться.

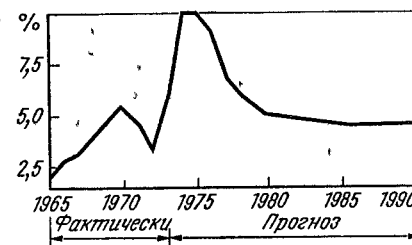


Рис 2 Уровень инфляции

В прогнозе предусматривается, что газопровод в долине р Маккензи, о котором очень много пишут, не будет сооружен в течение рассматриваемого периода, трансалаянский нефтепровод начнет действовать в 1978 г, а параллельный ему газопровод вступит в строй в 1982 г. Ввод в строй второго арктического нефтепровода проектируется на 1983 г.

Предполагается также, что технический прогресс будет происходить равномерно без каких-либо неожиданных сюрпризов.

Ожидается, что к 1990 г в автомобильном парке США будет 6 млн легковых автомобилей, причем 10% из них в качестве источника энергии используют топливные элементы.

Введение в строй первой коммерчески выгодной промышленной реакторной установки на быстрых нейтронах не ожидается до 1990 г, а термоядерная промышленная установка, если смотреть реально, не вступит в строй ранее чем через 10 лет после этого. Поэтому их влияние в прогнозе не учитывается.

Солнечная энергия к 1990 г будет использоваться для частичного обогрева помещений и нагрева воды. В прогнозе принимается, что за счет солнечной энергии будет обогреваться пятая часть вновь сооружаемых жилых зданий.

Предполагается, что в прогнозируемый период на мировом рынке будет достаточное количество нефти для удовлетворения потребностей США и зарубежных стран. Однако ожидается также, что в период с 1985 по 1990 г потребность в нефти будет влиять на ее добычу, осуществляемую экспортерами нефти.

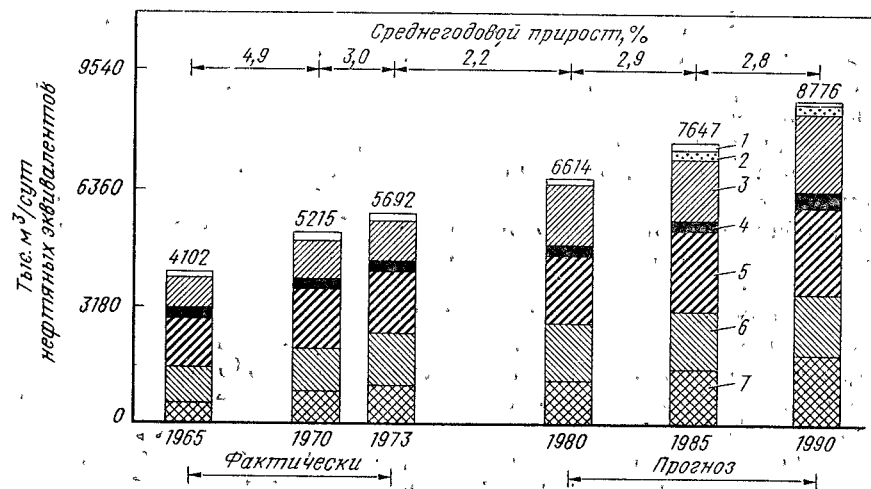


Рис. 3. Потребности США в энергии по секторам потребления:

1 — экспорт; 2 — технологические потери (связанные с превращением одного топлива в другое, например, угля в газ); 3 — коммунально-бытовой сектор; 4 — химическое сырье; 5 — промышленный сектор; 6 — транспорт; 7 — производство электроэнергии и потери при ее передаче на расстояние.

Потребность США в энергии Потребность США в энергии по секторам потребления приводится на рис. 3.

В период с 1965 по 1970 г потребление энергии в США увеличилось примерно на 5% в год, а в последние годы прирост снизился до 3%.

Компания «Шелл» считает, что в течение прогнозируемого периода потребности США в энергии будут увеличиваться, но прирост потребления энергии несколько превысит 2% в течение оставшихся лет этого десятилетия и будет немного меньше 3% в течение 80-х годов.

Снижение роста потребления произойдет в результате как экономии энергии, проводимой в стране, так и увеличения в будущем цен на энергию при замедленном приросте населения.

Транспортный сектор экономики, доля которого в течение прогнозируемого периода в общем энергетическом балансе будет снижаться, зависит в основном от нефти. Это заключение вытекает из того, что, по мнению компании «Шелл», технический прогресс в области транспорта коснется главным образом совершенствования двигателей внутреннего сгорания. Увеличение использования топлива усовершенствованной техникой вызовет изменение роста в его потребности. На транспортный сектор традиционно приходилось 23% расхода общего энергетического баланса, но к 1990 г доля этого сектора согласно прогнозу должна снизиться до 18%.

Для производства химического сырья в настоящее время используется около 3% общего потребления источников энергии, но ожидается, что в течение прогнозируемого периода потребление источников энергии на эти цели достигнет 6%. Этот прирост явится результатом растущей тенденции к замене природных продуктов по мере снижения ресурсов природного газа синтетическими, получаемыми из нефти.

В жилищно-коммерческом секторе, к которому относятся жилые дома, склады и служебные помещения, крупнейшим источником топлива останется природный газ. Несмотря на то, что потребности в энергии этого сектора будут возрастать, его доля в общем энергетическом балансе сохранится постоянной на уровне 22—23%.

В промышленном секторе природный газ, используемый в качестве первичного топлива для заводских котельных, будет заменяться углем и в меньшей степени нефтью. Предполагается, что доля этого сектора к концу прогнозируемого периода снизится с 30 до 27%.

Если не считать прироста потребления нефти для получения химического сырья, наибольший прирост потребления ожидается в коммунальном секторе. Потребность этого сектора будет удовлетворяться главным образом за счет ускоренного производства ядерной энергии. Согласно прогнозу, доля этого сектора в общем энергетическом балансе увеличится в течение рассматриваемого периода с 26 до 32%.

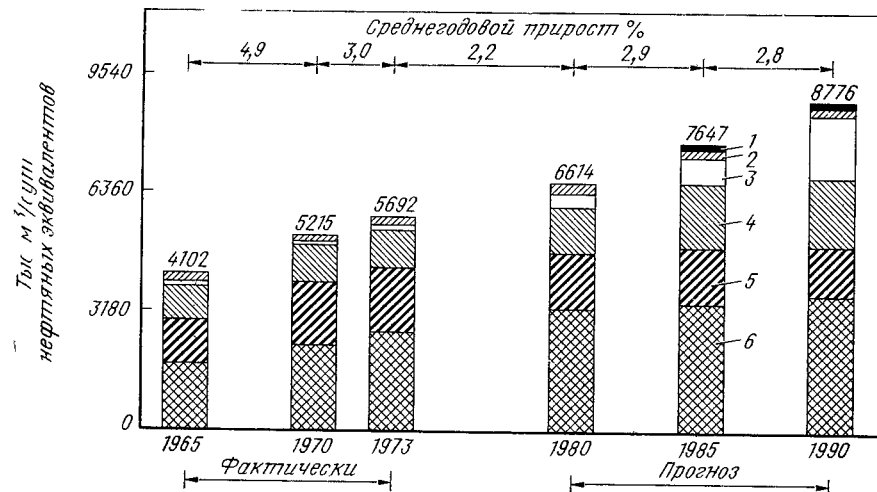


Рис 4 Энергетические ресурсы первичных источников энергии в США

1 — солнечная энергия 2 — гидро и геотермальная энергия 3 — ядерная энергия, 4 — уголь 5 — газ 6 — нефть

Энергетические ресурсы США Компания «Шелл» полагает, что, как было указано в предыдущем разделе, потребности страны в энергии, выраженной в нефтяных эквивалентах, возрастут с 5692 тыс м³/сут в 1973 г до 8776 тыс м³/сут в 1990 г

На рис 4 приводятся изменения энергетических ресурсов США в течение прогнозируемого периода

Нефть, природный газ и уголь до 1990 г будут оставаться основными источниками энергоснабжения. Однако на долю ядерной энергии с 1973 по 1990 г придется более половины прироста энергетических ресурсов

Несмотря на то, что потребление нефти, в том числе импортной, будет продолжать незначительно увеличиваться, доля ее в общем энергетическом балансе несколько снизится — с 46% в 1973 г до 42% в 1990 г. Доля природного газа в общем энергоснабжении снизится вдвое — с 30% в 1973 г до 15% в 1990 г. Доля угля увеличится с 19% в 1973 г до 21% в 1990 г. Доля ядерной энергии в общем энергоснабжении возрастет примерно с 1% в 1973 г до 20% в 1990 г. Поэтому в энергоснабжении страны ядерная энергия станет играть такую же важную роль, как и уголь

Потребность США в нефти. Несмотря на то, что абсолютные размеры потребления нефти в стране будут увеличиваться, темпы роста потребления нефти согласно прогнозу снизятся к концу прогнозируемого периода по сравнению с традиционными от 5 до 1% в год (рис 5)

Компания «Шелл» считает, что увеличивающиеся потребности коммунально-бытового сектора в нефти объясняются в первую

очередь недостатком природного газа. Для обогрева помещений природный газ частично будет заменен электричеством, а частично нефтью. Тем не менее, доля этого сектора на нефтяном рынке останется постоянной и будет равна примерно 16%

В промышленном секторе, по нашему мнению, также возрастет доля потребляемой нефти, поскольку природный газ из этого сектора будет переключен на другие нужды. Промышленность в 1990 г израсходует 25% потребляемой в стране нефти по сравнению с 16% в последние годы

В коммунальном секторе будет вначале наблюдаться некоторое увеличение потребления нефти, а затем по мере того, как уголь и ядерная энергия начнут использоваться вместо нефти для производства электроэнергии, потребление нефти в этом секторе снизится

В то время как в 1973 г доля жилищно-коммерческого сектора составляла 10% общего потребления нефти в стране, к 1985 г она упадет до 8%, а к 1990 г — до 4%

Транспортный сектор, включающий легковые и грузовые автомобили, железнодорожный транспорт, авиацию и другие транспортные средства, в большой степени зависит от нефти. Темпы роста потребления нефти этим сектором будут сокращаться. Его доля в потреблении нефти в стране снизится с 52% в 1973 г до 42% в 1990 г

Снижение потребления нефти будет связано с усовершенствованием топливных систем как автомобилей, так и самолетов. Про-

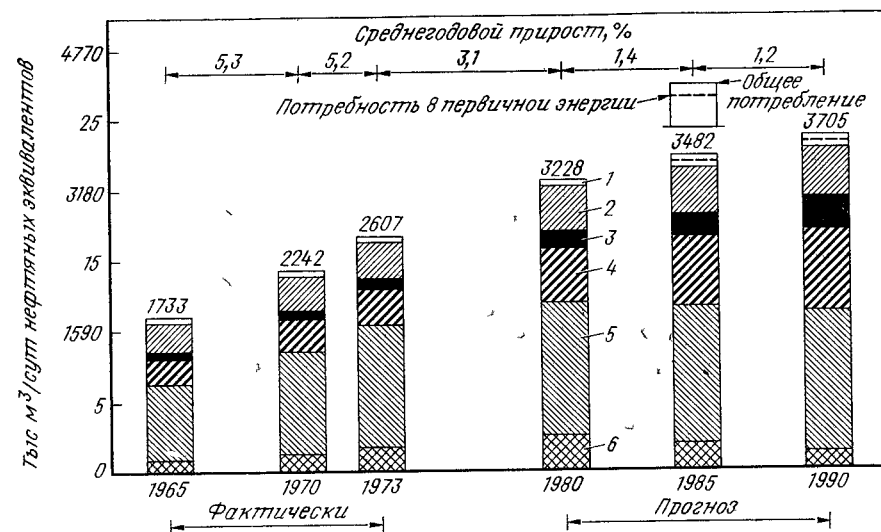


Рис 5 Потребность рынков США в нефти

1 — экспорт 2 — коммунально-бытовой сектор 3 — химическое сырье, 4 — промышленный сектор, 5 — транспорт, 6 — потребность в электроэнергии и нефти для газификации

ектируются облегченные легковые автомобили с уменьшенными габаритами и с большим пробегом на литр бензина. Кроме того, использование объединенных парков автомобилей, организация массовых транзитных перевозок даст возможность сократить пробег автомобилей.

Проектируются более эффективные самолеты с большими коэффициентами полезной нагрузки.

Для транспортного сектора вследствие особой важности для него нефти дается подробный прогноз по отдельным нефтепродуктам и по различным видам транспортных средств (рис 6). Размеры потребления топлива легковыми автомобильным транспортом в течение прогнозируемого периода будут снижаться, но это снижение должно компенсироваться увеличением потребления бензина грузовыми автомобилями и автобусами. В конечном итоге потребление автомобильного бензина для всех видов транспорта останется приблизительно на неизменном уровне. Быстрее всего будет увеличиваться потребление дизельного топлива для грузовых автомобилей и для автобусов, которое будет возрастать на 5,5% в год, а также реактивного топлива для самолетов, рост потребления которого составит 1,7% в год.

Нефтяные ресурсы США. В 1974 г суммарный расход нефти в США составил 2512 тыс м³/сут, из которых на чистый импорт приходилось 938 тыс м³/сут.

Согласно прогнозам фирмы «Шелл», как видно из рис 7, темпы прироста поступления нефти в США в оставшиеся годы текущего десятилетия по сравнению с установившимися количествами должны снизиться с 5 до 3% в год. В последующем, в 1980 — 1990 гг, ожидается дальнейшее снижение темпов прироста поступления нефти до 1%.

В 1990 г. немногим более половины потребляемой нефти будет добываться в стране, а остальную часть составит импорт. Добыча нефти в нижних 48 штатах и в Южной Аляске в настоя-

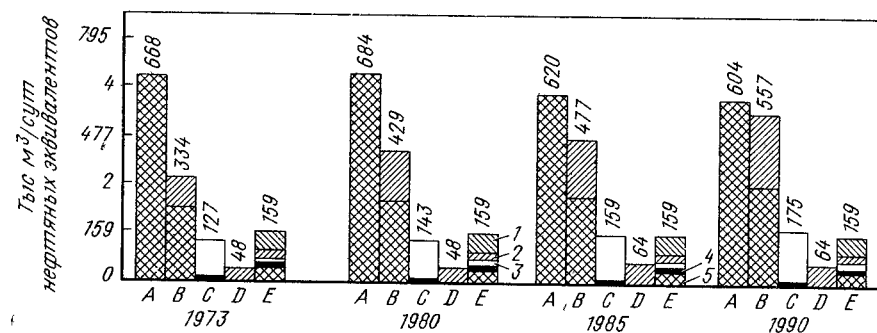


Рис 6 Потребность транспорта по его видам в различных типах нефтепродуктов:

1 — остаточное топливо, 2 — дизельное топливо, 3 — реактивное топливо, 4 — авиационный бензин, 5 — автомобильный бензин, А — легковые автомобили, В — грузовые автомобили и автобусы, С — авиация, Д — железнодорожный транспорт, Е — прочие виды транспорта

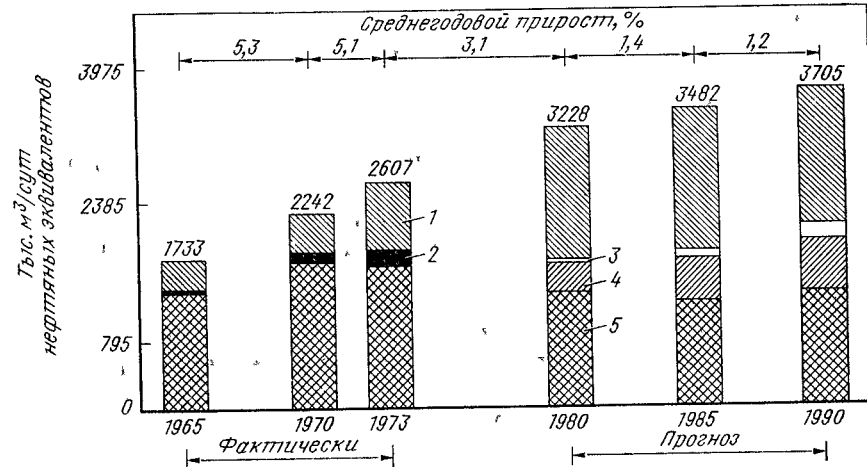


Рис 7 Нефтяные ресурсы США

1 — заморский импорт, 2 — импорт из Канады, 3 — синтетическая нефть (из сланцев угля), 4 — нефть из арктических районов США, 5 — нефть и газовый конденсат из нижних штатов США и Южной Аляски

щее время снижается. Согласно прогнозам фирмы «Шелл», несмотря на все будущие инициативы в области энергетики, к 1990 г. добыча нефти в стране не может быть больше 1272 тыс м³/сут. Однако мы надеемся, что США смогут добывать дополнительно 636 тыс м³/сут нефти в арктических районах. Более того, мы считаем, что с 1985 г. должна начать поступать синтетическая нефть¹ (рис. 8), производство которой к 1990 г. должно достичь 159 тыс м³/сут.

Потребность США в природном газе. Отечественные ресурсы природного газа чрезвычайно ограничены. Поэтому надо говорить о том, каким образом следует распределить оставшиеся ресурсы природного газа в прогнозируемый период.

На рис. 9 показано прогнозируемое снижение ресурсов природного газа в США и соответственно потребление природного газа в стране в будущем. Согласно прогнозам фирмы «Шелл», при ежегодном увеличении потребления природного газа в прошлом на 6% в будущем оно будет снижаться на 1% в год.

Ожидается, что использование природного газа в качестве сырья для производства химических продуктов будет увеличиваться, однако в меньшей степени, чем производство самих химических продуктов. Это объясняется тем обстоятельством, что природный газ используется также в качестве сырья для получения сельскохозяйственных удобрений, производство которых будет увеличиваться медленнее, чем нефтехимических продуктов.

¹ Продукты переработки твердых горючих ископаемых.

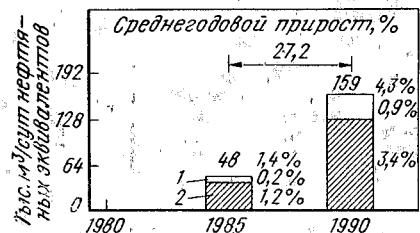


Рис. 8. Ресурсы синтетической нефти (проценты показывают долю от общих ресурсов нефти):

1 — переработка угля; 2 — переработка горючих сланцев и битуминозных песков

новые месторождения, добыча природного газа в стране непрерывно сокращается и к 1990 г. снизится до 340 млрд. м³ в год. Картина с природным газом отличается от положения с нефтью, где после периода снижения добычи наступил период ее увеличения. Несмотря на поступление природного газа из арктических районов США в количестве 48 млрд. м³ в 1990 г. и дополнительный импорт сжиженного природного газа в количестве 65 млрд. м³ в год, общее поступление природного газа в страну вероятно сократится с 623 млрд м³ в 1973 г. примерно до 510 млрд. м³ в 1990 г. (рис. 10).

Импорт природного газа из Канады в течение указанного периода также будет снижаться. Относительно незначительные поступления синтетического природного газа, получаемого из нефти и путем газификации угля (рис. 11), не смогут изменить общую тенденцию снижения поступления газа, которое в период с 1985 по 1990 г. будет падать более чем на 1% в год.

Потребность США в угле и его потенциальные ресурсы. Уголь в США является наиболее распространенным источником энергии. На рис. 12 показано, как представляют себе в США увеличение потребностей в угле в связи с предполагаемым изменением энергетической политики страны в сторону расширения отечественных источников энергии.

Согласно прогнозам фирмы «Шелл», потребление угля в обозреваемый период значительно возрастает. В наибольшей степени увеличится потребление угля в промышленном секторе, где он вытеснит природный газ, который в настоящее время используется в качестве котельного топлива.

До 1985 г. потребление угля будет увеличиваться в коммунальном секторе и в промышленности вместе взятых, но после 1985 г. в связи с увеличением мощности ядерной энергетики доля угля, используемого в коммунальном секторе, снизится. Газификация угля начнет увеличиваться после 1980 г.

Технология производства жидких топлив на базе угля пока еще отстает от достижений в области его газификации. Поэто-

Согласно прогнозам фирмы «Шелл», в коммунальном секторе потребление природного газа практически полностью прекратится. К концу прогнозируемого периода природный газ будет использоваться лишь для удовлетворения потребностей в пиковые периоды.

Ресурсы природного газа США. Основная доля ресурсов природного газа в США до 1990 г. будет приходиться на источники нижних 48 штатов и Южной Аляски. Несмотря на но-

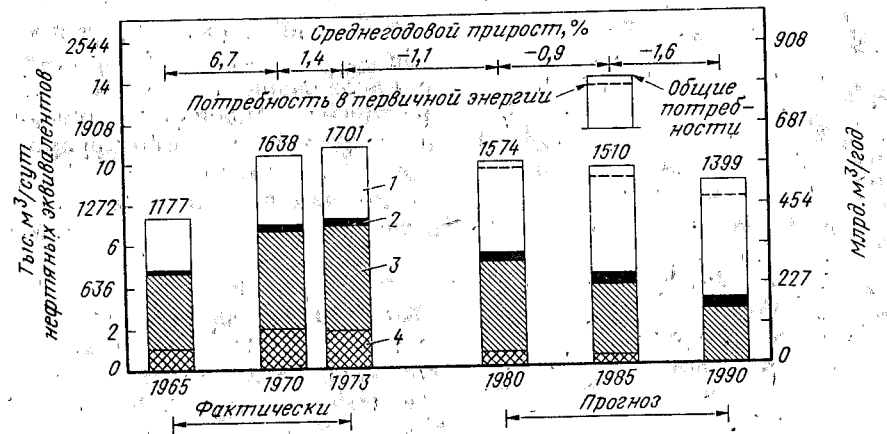


Рис. 9. Потребности США в горючем газе по секторам потребления:

1 — жилищно-коммерческий сектор; 2 — сырье для химической промышленности; 3 — промышленность; 4 — коммунальный сектор

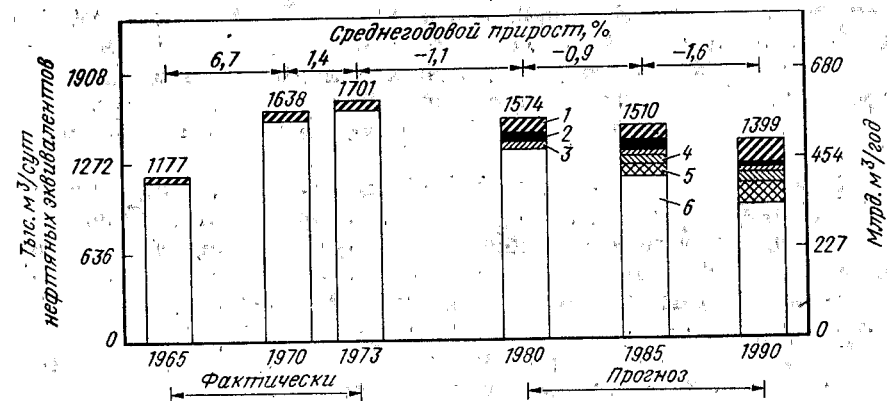


Рис. 10. Поставки газа в США:

1 — импорт сжиженного природного газа; 2 — импорт природного газа из Канады; 3 — синтетический горючий природный газ из нефти; 4 — газификация угля; 5 — газ из арктических районов США; 6 — газ из нижних 48 штатов и Южной Аляски

му доля жидких топлив, получаемых из угля, в энергетическом балансе будет незначительной.

В отличие от других топлив, согласно прогнозам на короткий и средний сроки, размеры потребления угля будут ограничиваться не ресурсами, а его потребностями.

Вместе с тем важную роль в ограничении поставок угля будут играть такие факторы, как требования к охране чистоты окружающей среды, необходимость надлежащего технического оснащения угледобывающей промышленности и транспортирования угля.

На рис 12 площади, обозначающие превышение ресурсов над потребностями, соответствуют потенциальным возможностям добычи угля при условии продления рабочего дня, открытия шахт, которые были закрыты в связи с тем, что экономичность их эксплуатации была на пределе, а также при условии решения всех проблем, связанных с транспортированием угля и производством угледобывающего оборудования. Потенциальные возможности такой дополнительной добычи, выраженные в нефтяных эквивалентах, составляют примерно 318 тыс м³/сут в 1985 г и 477 тыс м³/сут в 1980 г

Одной из проблем в предстоящие 15 лет будет разработка угольных месторождений в западных штатах страны, которые представляют собой районы с небольшой плотностью населения, удаленные от центров потребления энергии

США в 48 нижних штатах располагают примерно одной третью разведанных извлекаемых мировых запасов угля. В табл 1 приводится распределение запасов угля по географическим районам, способам добычи и содержанию серы

Общие запасы угля в месторождениях, если учитывать только экономично извлекаемые угли, размещенные на глубине 300 м и менее, оцениваются в 258 млрд т. Примерно половину этих запасов составляют угли, которые можно добывать открытым способом

Такие месторождения размещены главным образом в западных районах страны

Потребление электроэнергии. Потребление электроэнергии, как это показано на рис 13, в течение 1973—1990 гг должно удвоиться. Однако темпы роста в прогнозируемый период не достигнут традиционного уровня 7—8% в год, а будут равны после 1980 г 5% в год

Снижение темпов роста производства электроэнергии обусловлено ростом ее стоимости, вызванной в первую очередь увеличением стоимости топлива

В течение прогнозируемого периода потребление электроэнергии вероятно будет увеличиваться во всех секторах экономики страны, однако наибольший прирост ожидается в жилищно-коммунальном секторе

Фирма «Шелл» считает, что в течение прогнозируемого периода начнут эксплуатироваться электромобили, а их потребность в энергии должна составить к 1990 г 11 129 м³/сут нефтяных эквивалентов, или около 1% от общего потребления электроэнергии в стране

Производство электроэнергии. На рис 14 представлено потребление первичной энергии для производства электроэнергии. Необходимо обратить внимание на то, что расход первичной энергии примерно в три раза превышает количество получаемой при этом электроэнергии (см рис 13). Разница между потребляемой первичной энергией и получаемой электроэнергией составляет из

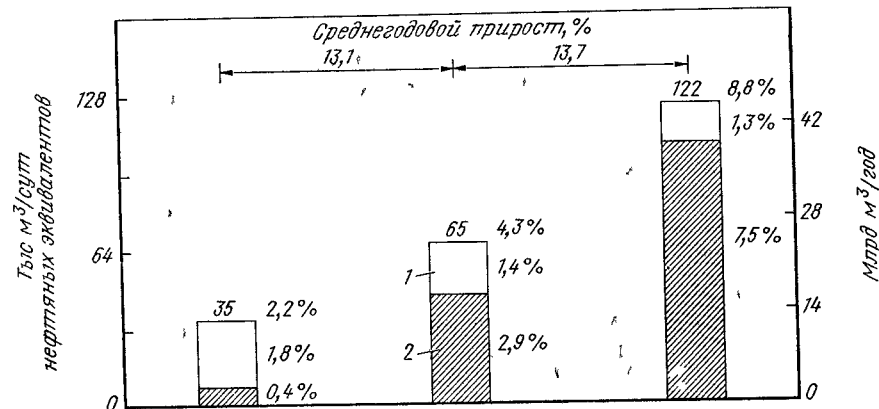


Рис 12 Ресурсы синтетического газа (проценты показывают долю от общих ресурсов газа)

1 — производство газа из нефти 2 — производство газа из угля

потерь в процессе генерирования электроэнергии и передачи ее на расстояние

Увеличение производства электроэнергии будет обеспечиваться в основном за счет использования ядерной энергии. Количество угля, на долю которого традиционно приходилось около половины первичной энергии, используемой для производства электроэнергии, будет до 1985 г возрастать, но в последующем его доля среди

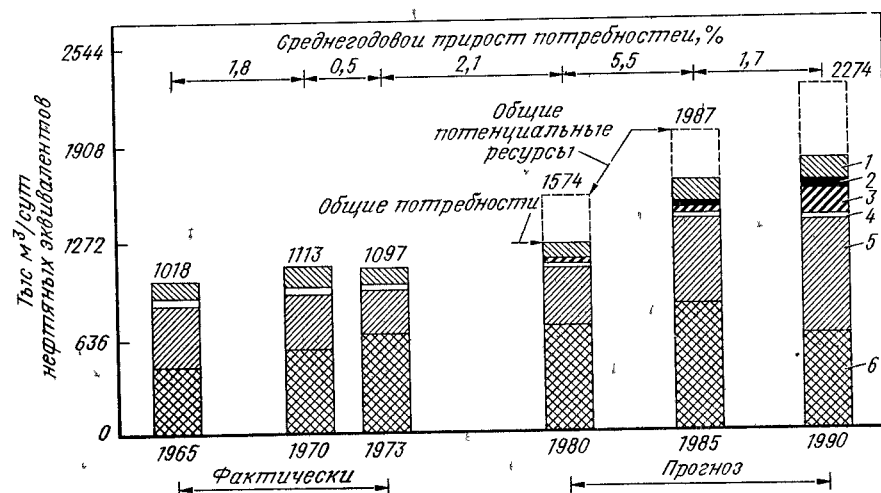


Рис 12 Потребности США в угле и его потенциальные ресурсы

1 — экспорт 2 — получение жидкого топлива, 3 — газификация 4 — жилищно-коммунальный сектор и транспорт, 5 — промышленный сектор 6 — коммунальный сектор

Таблица 1 Запасы угля в США

Район США	Теплотворная способность, тыс. ккал/т	Промышленные запасы угля, который может быть добыт экономически доступными методами, млрд. т					
		Метод добычи			Содержание серы, %		
		Открытым способом	Подземным способом	Всего	1,0 и менее	От 1,1 до 1,5	Более 1,5
Запад страны	4 762,8	75,4	59,2	134,6	100,2	33,3	1,1
Побережье Мексиканского залива	4 132,8	3,5	—	5	—	3,5	—
Средний запад	5 997,6	18,6	40,7	59,3	0,6	0,6	58,1
Аппалачи	6 652,8	11,8	48,8	60,6	20,5	9,9	30,2
Всего	5 468,4	109,3	148,7	258,0	121,3	47,3	89,4

источников первичной энергии для производства электроэнергии станет постепенно снижаться. Кроме того, в прогнозируемый период для этой цели будет снижаться также доля природного газа и нефти.

Объем производства гидроэлектроэнергии (в том числе геотермальной) останется на прежнем уровне, и, следовательно, его доля также снизится.

На долю ядерной энергии, используемой для производства электроэнергии, в 1973 г. приходилось всего 5%, а в 1990 г. почти три четверти электроэнергии будет производиться на атомных электростанциях.

Есть все основания считать, что найдутся достаточные количества U_3O_8 для обеспечения прогнозируемого развития ядерной энергетики. Однако, чтобы эти прогнозы оправдались, необходимо немедленно начать увеличение мощности страны по обогащению урана.

Предельные энергетические ресурсы США. Под предельными ресурсами энергии подразумеваются ее запасы, которые могут быть извлечены экономически приемлемыми способами. Как видно из рис. 15, наиболее распространенным источником энергии в США является уголь. На долю нефти приходится 13%, или около 28618 тыс. м³/сут. На долю природного газа — около 9% и на долю сланцевой смолы около 6% предельных энергетических ресурсов. Запасы урана при использовании в реакторах с водяным охлаждением составляют 525 тыс. т, или 3% энергетических ресурсов.

Несмотря на то, что в США имеются большие запасы источников энергии, они не позволяют производить достаточное количество энергии в таком виде, в каком она могла бы удовлетворить потребность страны в ближайшем будущем. В связи с этим придется энергию импортировать, а наиболее удобную форму для импорта имеет нефть.

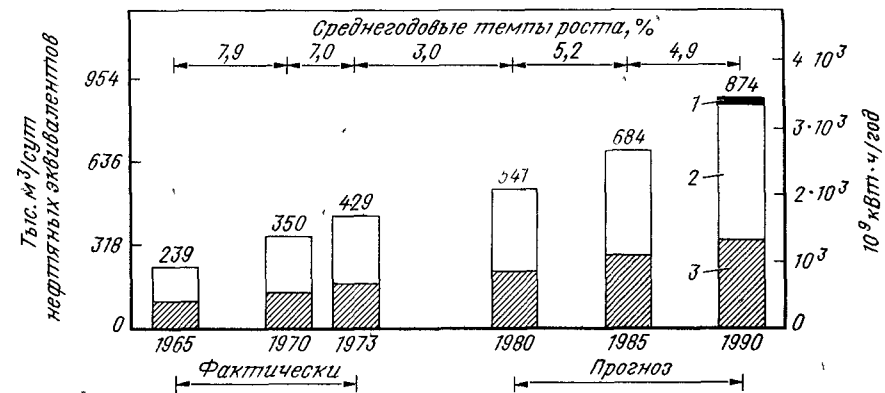


Рис. 13. Потребление электроэнергии

1 — транспортный сектор; 2 — жилищно-коммерческий сектор, 3 — промышленный сектор

Импорт—экспорт. Потребности страны в энергии, даже с учетом прогнозируемого снижения темпов потребления энергии, не могут быть обеспечены отечественными ресурсами. Фирма «Шелл» считает, что для восполнения недостатка энергии необходимо продолжать импортировать нефть.

Импорт нефти к 1985 г. должен достичь 1590—1749 тыс. м³/сут и после этого стабилизироваться (рис. 16).

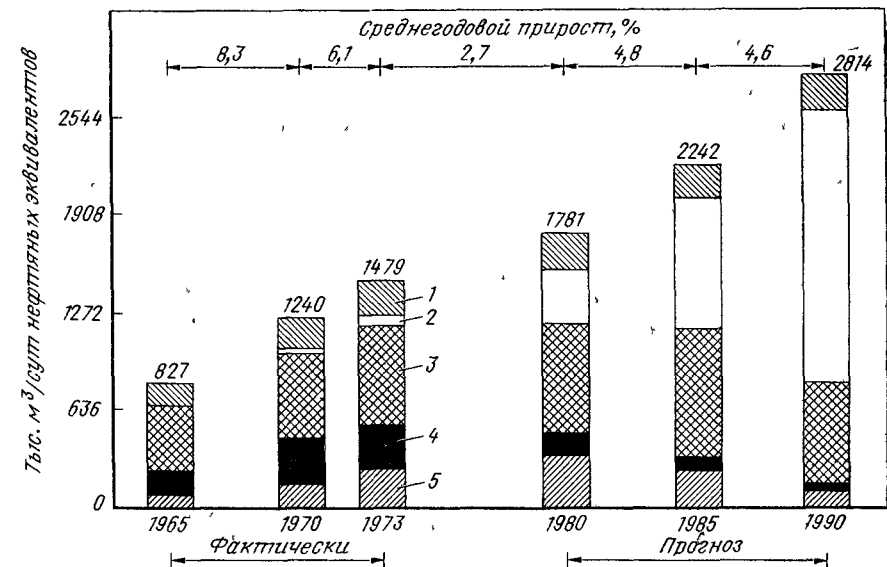


Рис. 14. Первичная энергия для получения электричества.

1 — гидроэнергия; 2 — ядерная энергия, 3 — уголь, 4 — газ; 5 — нефть

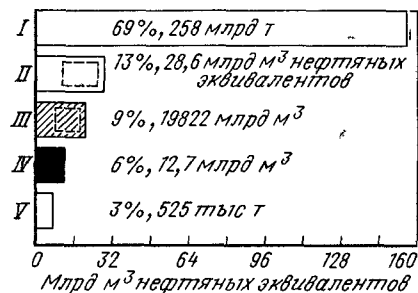


Рис 15 «Окончательные» энергетические запасы США
I — уголь (потенциальные запасы не учитываются) II — нефть и газовый конденсат (пунктиром показано количество которое может быть добыто из обнаруженных запасов) III — природный газ (см примечание к II) IV — горючие сланцы V — уран (водяной реактор)

Предполагается, что потребность в импортной нефти будет удовлетворяться путем межрегиональных ее перевозок

В 1974 г крупнейшим поставщиком нефти в США была Канада. Из пяти основных поставщиков нефти в США (Канада, Нигерия, Иран, Саудовская Аравия и Венесуэла) в бойкоте 1973—1974 г принимала участие только Саудовская Аравия. Импорт нефти из Канады, очевидно, полностью прекратится в 1983 г. Добыча нефти в Венесуэле по всей вероятности также достигла максимума. Поэтому экспорт венесуэльской нефти в США также не будет увеличиваться. Следовательно, будет возрастать импорт из стран Восточного полушария и главным образом из стран ОПЕК.

В ближайшем будущем предполагается импорт сжиженных природных газов из Алжира, однако до 1977 г по техническим причинам он будет ограничен. Импорт сжиженных природных газов из района Персидского залива и Дальнего Востока до 1980 г не ожидается.

Мировая добыча нефти. После того как определились потребности США в импортной нефти, встает вопрос о том, смогут ли другие страны капиталистического мира удовлетворить потребность США? На рис 17 показано региональное распределение добычи нефти в мире. Как видно из рисунка, основными нефтедобывающими регионами мира являются Ближний Восток и социалистические страны.

Из указанных регионов основным экспортером будут страны Ближнего Востока.

Межрегиональные перевозки нефти. Чистый объем межрегиональных перевозок нефти может быть определен путем оценки экспорта из социалистических стран и внутреннего потребления в остальных нефтедобывающих районах капиталистического мира.

Фирма «Шелл» считает, что в связи с предполагаемым увеличением цен на нефть и в связи с увеличением добычи нефти в потребляющих странах международная торговля нефтью в течение прогнозируемого периода стабилизируется на уровне 4770 тыс м³/сут (рис 18). Такое количество нефти достаточно для обеспечения мировых потребностей за пределами социалистических

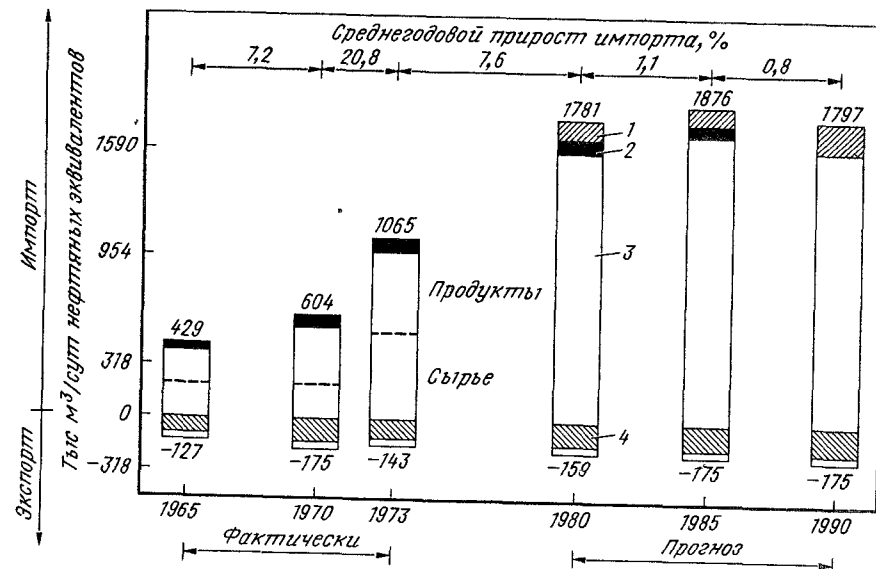


Рис 16 Импорт и экспорт энергии (США)
1 — сжиженный природный газ, 2 — природный газ, 3 — нефть, 4 — уголь

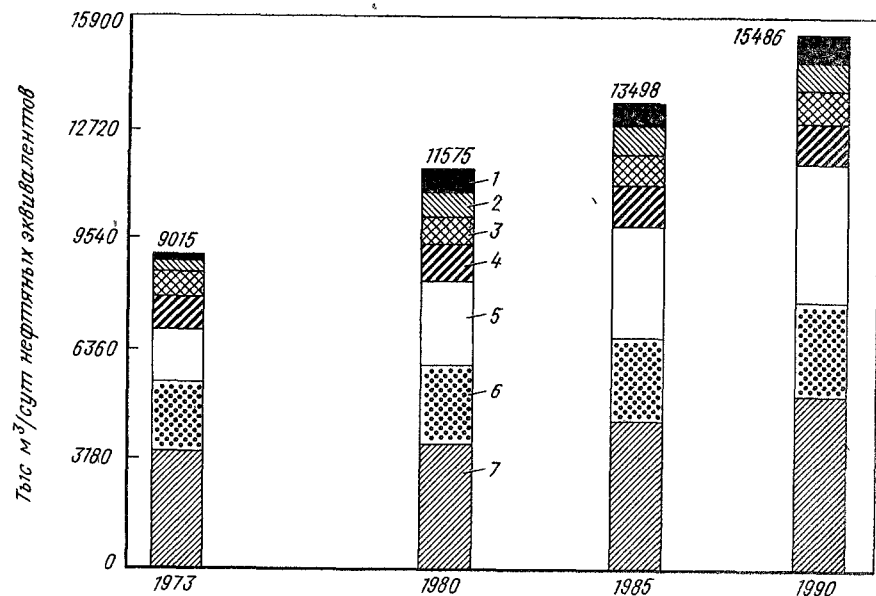


Рис 17 Мировая добыча нефти
1 — Западная Европа, 2 — Дальний Восток, 3 — Южная Америка, 4 — Африка, 5 — социалистические страны, 6 — Северная Америка, 7 — Ближний Восток

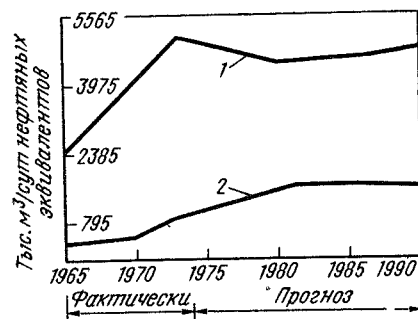


Рис 18 Межрегиональная торговля нефтью (без учета социалистических стран).

1 — межрегиональная торговля нефтью,
2 — импорт нефти в США

Общее потребление энергии в США будет увеличиваться медленно. По мере внедрения атомной энергии и разработки способов производства жидких и газообразных топлив из угля планируются сдвиги в структуре импорта. Несмотря на это, доля импорта нефти по линии межрегиональной торговли к 1990 г. возрастет примерно до одной трети по сравнению с примерно одной четвертью в 1975 г.

Выводы

Ниже приводятся основные сведения, касающиеся энергетических прогнозов для США.

Общие потребности энергии. Потребление энергии в США будет продолжать увеличиваться, но темпы роста, очевидно, снизятся с 5% в 1960—1970 гг., до 2—3% (в среднем) в 1970—1990 гг.

Примерно половину прироста потребления предполагается удовлетворять за счет ядерной энергии. Остальная часть прироста в потреблении энергии будет удовлетворяться за счет угля и нефти (в том числе импортной).

Нефть. Потребление нефти будет продолжать увеличиваться, но темпы прироста потребления снизятся с 5% в 1965—1970 гг. до 1—2% в 1980—1990 гг.

Газ. Внутреннее потребление природного газа вместе с синтетическим будет снижаться. Даже с учетом импортного сжиженного газа общее его потребление будет падать.

В связи со снижением внутреннего потребления, а также в связи с небольшой базой газификации угля и ограниченными возможностями импорта возникнет сильная конкуренция между потребителями газа.

Уголь. Потребности в угле ограничены. Однако предполагается увеличение темпов роста потребления угля с 2% в 1965—1970 гг. до 3—4% с 1973 по 1985 гг. После 1985 г. потребление угля понизится.

стран. Для достижения этого уровня необходимо, чтобы добыча нефти в Саудовской Аравии, располагающей наибольшей нефтедобывающей базой, к 1990 г. была увеличена до 2067 тыс. м³/сут. Эта предпосылка находится в соответствии с обеспечением здоровой мировой экономики, при которой должны быть освоены необходимые дополнительные капиталовложения для развития нефтяной промышленности Саудовской Аравии.

Общее потребление энергии в США будет увеличиваться мед-

На долгосрочный прогноз в потреблении угля окажет влияние ряд неопределенных факторов, связанных с развитием обеспечения страны источниками энергии, а именно: политика правительства в области импорта нефти и охраны окружающей среды, экономика переработки угля для производства жидких и газообразных топлив, ограничения, обусловленные недостатком транспортных средств и технического оборудования для добычи угля и темпов развития ядерной энергетики.

Ядерная энергия. Намечается усиленное развитие ядерной энергетики, но в связи с недостаточной современной базой ее роль в снижении доли ископаемых топлив и в обеспечении энергией коммунального сектора до 1985 г. будет незначительной.

Сбыт электроэнергии. Потребление электроэнергии будет продолжать увеличиваться, но темпы прироста потребления снизятся с традиционных 7—8 до 4—5% в период 1980—1990 гг.

Импорт нефти. Даже при снижении темпов роста потребления энергии ее отечественные ресурсы недостаточны, и поэтому США должны будут зависеть от импортной нефти.

Предполагается, что импорт нефти в США достигнет максимального уровня 1701 тыс. м³/сут к 1985 г. Предполагается также, что на международном рынке будет достаточное количество нефти для обеспечения импортных потребностей США. Однако для удовлетворения потребностей капиталистических стран в нефти в 1990 г. необходимо, чтобы в Саудовской Аравии добыча нефти была доведена до 2067 тыс. м³/сут.

Ограничения, связанные с охраной окружающей среды. Необходимость соблюдения требований по охране окружающей среды от загрязнения резко ограничивает возможности увеличения ресурсов всех основных видов источников энергии. Эти требования тормозят также замену нефти и природного газа углем.

Экономия. Возможности США в экономии энергии недостаточны для компенсации ее дефицита.

Заключение

В течение всего прогнозируемого периода основная часть энергии, потребляемой в стране, будет удовлетворяться за счет отечественных источников. Однако в то время как в 1974 г. США зависели от импортной энергии на 16%, в 1990 г. эта зависимость согласно нашему прогнозу достигнет 20%. Энергия будет импортироваться в основном в виде нефти и нефтепродуктов, а также небольших количеств сжиженного природного газа. Несмотря на то, что зависимость США от импортной энергии несколько возрастет, эта зависимость будет меньше, чем у других стран, являющихся крупными потребителями энергии.

Экономика США все еще будет продолжаться базироваться в основном на ископаемом топливе. В 1990 г. на долю нефти, природного газа и угля в энергобалансе страны будет приходиться 77% потребляемой в стране энергии.

Несмотря на то что начнут использоваться такие источники энергии, как топливо из горючих сланцев, газ и жидкое топливо из угля, а также солнечная энергия, их доля к 1990 г в энергобалансе США будет очень незначительной. Энергия, получаемая за счет синтеза ядер водорода, энергия океана и прибоа в прогнозируемый период не будут использоваться. Для освоения этих видов энергии требуется более высокоразвитая техника, которая может быть освоена только в XXI в.

Легковые автомобили будут меньшими и более экономичными. Примерно к 1985 г электромобили составят значительную часть автомобильного парка и будут предназначены по всей вероятности для вспомогательного или специального использования.

Потребители энергии с большим сознанием будут относиться к вопросам экономии энергии. Улучшенная теплоизоляция жилых помещений и использование более экономичных приборов домашнего обихода станут важным фактором с точки зрения индивидуального потребления энергии.

Для обеспечения непрерывного экономического развития в стране и в мире будет достаточное количество источников энергии. Более того, мы полагаем, что энергоснабжение в прогнозируемый период может быть обеспечено без нанесения ущерба окружающей нас воздуху, воде и земле.

Энергетический прогноз фирмы «Шелл» дает возможность сделать один главный вывод для того чтобы в значительной мере снизить импорт нефти в США до 1990 г, потребуется тщательная разработка всеобъемлющей программы. Эта программа должна оказать влияние на изменение структуры энергоснабжения, а также вызвать в стране коренные изменения, ведущие к преобразованию структуры потребления энергии и образа жизни. Могут ли США выполнять такую программу? Знаем ли мы, какой должна быть эта программа? Если нет, то какие имеются альтернативные решения проблемы?

ОБСУЖДЕНИЕ

Е. М. Диксон (Станфордский исследовательский институт). Меня интересует отношение Вашего варианта к варианту господина Хемфилла. По всей вероятности для определения равновесия между ресурсами и потреблением энергии в мире Вы учитывали мировую конъюнктуру. Можете ли Вы сказать нам, при какой относительной цене устанавливался этот баланс?

С. Дж. Боббен. Я твердо обещал перед моим выступлением, что не буду касаться вопроса о ценах. Единственное, что я могу сказать, это то, что цены на нефть и природный газ, а также на другие источники энергии будут увеличиваться.

С. С. Пеннер (Калифорнийский университет, Сан-Диего). Мне кажется, что Ваш прогноз относительно прогресса в области производства синтетических топлив, особенно из горючих сланцев, очень консервативен. Вы ничего не сказали относительно возмож-

ности использования отходов, во всяком случае я этого не уловил. Насколько можно судить по Вашим схемам, использование солнечной энергии в 1985 и 1990 гг будет одинаковым. Мне кажется, что такая оценка для 1985 г завышена, а для 1990 г занижена. В Вашем варианте очень много неопределенностей, и поэтому им трудно воспользоваться для долгосрочного прогнозирования. Особенно неудовлетворительным, мне кажется, конечный вывод о том, что США будут импортировать 33% или примерно столько нефти, поступающей на международный рынок. Действительно ли Вы считаете экономически оправданным исходить из этого показателя при долгосрочном прогнозировании? Можете ли Вы прокомментировать этот вопрос?

С. Дж. Боббен. Из нашего прогноза вытекает, что долгосрочная ситуация экономически жизнеспособна до 1990 г. США будут потреблять в 1990 г одну треть межрегионально продаваемой нефти, но наша доля при этом не увеличится. Максимум межрегиональной продажи нефти составит около 4770 м³/сут. Одна треть этого количества — не так уж много. При определении данного показателя учитывались потребности остальной части капиталистического мира и доступ к нефти. В наши задачи входило изучить ресурсы и потребности других стран и определить, какое количество нефти необходимо для удовлетворения нужд их экономики. У нас в этом вопросе нет привилегированного положения. Иными словами, мы никого не выталкиваем из числа потребителей. Для США имеется достаточное количество нефти в мире.

М. К. Хардин (корпорация «Дженерал моторс», отделение «Детройт дизел эллисон дивижн»). Вы показали резкое увеличение в прогнозируемый период потребления ядерной энергии. Есть ли у Вас какие-либо серьезные сомнения в возможности своевременного выполнения графика этой программы на указанном уровне?

С. Дж. Боббен. Используемые нами показатели несколько ниже обычно приводимых в литературе, ниже, например, чем предсказывает правительство. Только недавно Управление энергетических исследований и разработок подошло к уровню, который был принят нами. Это, во-первых. Во-вторых, в настоящее время мы испытываем трудности, связанные с получением ядерных установок и, кроме того, период от начала проектирования до окончания сооружения атомных электростанций составляет около 10 лет и более. В других странах этот период равен 5—6 годам. В конгрессе страны, как нам кажется, наблюдается некоторое беспокойство в связи со все большим осознанием членами конгресса того, что наша страна все дальше уходит от энергетической самообеспеченности. Импорт энергии неуклонно возрастает. Возможно, конгресс введет нормирование, которое позволит быстрее внедрять ядерные установки, и в этом случае сроки сооружения атомных электростанций могут сократиться с 10—12 лет до примерно 6, 7 и 8 лет.

С. Л. Мейсел (корпорация «Мобил рисерч энд дивелопмент») Профессор Пеннер затронул несколько интересных проблем, касающихся трудностей прогнозирования. В наших исследованиях мы исходим из оптимистических возможностей допущения, которые только можно было принять в отношении горючих сланцев, ядерной энергии и нефти, добываемой в континентальном шельфе. Исходя из этих оптимистических предположений по нашим данным получается, что в 1985 г. США будут импортировать не 33% продаваемой на межрегиональном рынке нефти, как утверждаете Вы, а несколько меньше 25%. В этом вопросе наши выводы расходятся. Конкретное количество трудно предсказать, но оно будет ощутимым.

М. А. Эллиот (консультант по вопросам энергетики) Я хотел бы высказаться относительно замечания профессора Пеннера по поводу синтетических топлив. До последнего времени я сотрудничал в одной из хьюстонских компаний, которая в течение 10 лет и семи месяцев добивалась разрешения на сооружение установки для газификации угля. Административно-правовые ограничения таковы, что нам потребовалось 10,5 лет для получения одобрения по линии охраны окружающей среды от загрязнения. Поэтому, я думаю, что профессор Пеннер слишком оптимистично рассматривает вопрос о газификации угля.

ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГИИ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ «ТОПЛИВО—АВТОМОБИЛЬ»

Х. Ф. ШЕННОН

Компания по исследованию и разработкам
фирмы «Эксон», Линден, штат Нью-Джерси, США

В недавних исследованиях фирмы «Эксон» (США) и Компании по исследованию и разработкам фирмы «Эксон» сделана попытка установить зависимость между уровнем октановых чисел неэтилированных бензинов, степенью сжатия двигателей и экономией топлива. В данном докладе дается анализ этого вопроса, рассматривается чистая экономия нефти, которая может быть достигнута путем установления минимально допустимого октанового числа бензина по моторному методу, равного 87. В нем сделана также попытка показать, что в настоящее время и в обозримом будущем, учитывая ограниченные возможности капиталовложений, для достижения энергетической независимости этот путь не представляет интереса.

При изучении вопроса об эффективном использовании нефтепродуктов для автомобильного транспорта необходимо в комплексе рассмотреть систему «топливо—автомобиль». В данном докладе рассматривается связь между бензином и его компонентами, исследованная фирмой «Эксон» для Управления по охране окружающей среды.

При рассмотрении экономики нефтеперерабатывающей промышленности делаются допущения по многим показателям. В докладе без намерения очернить такой метод рассматриваются наиболее очевидные ловушки, в которые можно попасть при такой системе анализа. Допущения, касающиеся стоимости и выхода продукции, которые обычно глубоко скрыты в расчетах, решающим образом

сказываются на результатах исследований. В приводимых примерах рассматривается объем экономии, стоимость производства на нефтеперерабатывающем заводе, кредиты и выходы легких продуктов при более жестком проведении процесса.

Нереальные допущения ограничивают возможность предсказания преимущества или проблем, которые могут возникнуть в будущем.

При прогнозировании очень важно, чтобы как нефтяная, так и автомобильная промышленности пользовались такими прогнозами осторожно с максимальной заботой об их технической ценности.

Введение В связи с резким увеличением стоимости нефти и капиталовложений возникает настоятельная необходимость проведения дополнительных исследований для установления зависимости между увеличенными октановыми числами неэтилированных бензинов и более высокими степенями сжатия двигателя. В таких исследованиях должны изучаться преимущества экономии автомобильных топлив, которые могут быть достигнуты с одной стороны, за счет увеличения степени сжатия в двигателе при работе на более высокооктановых неэтилированных бензинах, а с другой — капиталовложениями в нефтеперерабатывающую промышленность и дополнительной потребностью в энергии. Чистый энергетический эффект от увеличения степени сжатия автомобильных двигателей представляет собой разницу между этими двумя противостоящими факторами.

В данном докладе наряду с энергетическим эффектом рассматриваются некоторые дополнительные факторы, которые могут оказывать влияние на экономию энергии и оптимизацию системы «топливо—автомобиль». К дополнительным факторам относятся: 1) влияние на расход энергии нефтеперерабатывающими заводами изменения соотношения выходов бензина и дистиллята, 2) модернизация двигателей с пониженными требованиями к детонационной стойкости бензина.

Оптимальное октановое число неэтилированного бензина. Зависимость между степенью сжатия двигателя и топливной экономичностью. В исследовании 1971 г. [1] приводится зависимость между степенью сжатия в двигателе и экономией топлива в определенных условиях эксплуатации автомобиля. При этом сделано было допущение, что динамика автомобиля будет поддерживаться постоянной путем либо уменьшения рабочего объема цилиндров двигателя, либо увеличения передаточного отношения главной передачи. Следует иметь в виду, что если не принять этих мер, то увеличение степени сжатия даст возможность улучшить характеристику двигателя за счет потенциально возможного повышения топливной экономичности. Эту зависимость можно видеть на рис. 1 (верхняя кривая), на котором показана относительная топливная экономичность автомобиля при движении по ровной дороге со скоростью 64,4 км/ч. Характеристики были получены на двигателе Джеренал моторс и подтверждены в последующем фирмой «Эксон» при испытаниях еще 20 различных двигателей. Данные получены на основании стендовых и дорожных испытаний.

В связи с тем, что водители не всегда ездят по ровной дороге со скоростью 64,4 км/ч, достигаемая экономия топлива за счет увеличения степени сжатия в двигателе в типичных условиях движения автомобилей будет меньше экономии, достигаемой при движении с постоянной скоростью. Для типичных условий движения экономия топлива составляла примерно 80% от экономии, достигаемой при постоянной скорости. Разница этого влияния, которая была взята в качестве основы для данных исследований, показана на нижней кривой рис. 1.

Зависимость оптимального октанового числа от сорта бензина. При любом исследовании, имеющем целью оптимальное использование октанового числа, необходимо изучать преимущества, которые можно получить при эксплуатации автомобильного парка на двух и более сортах бензина. На рис. 2 приводится зависимость среднего октанового числа бензина, определяемого по моторному методу, от степени сжатия при эксплуатации автомобильного парка на одном, двух и трех сортах бензина. В каждом случае предусматривалось удовлетворение 98% потребностей потребителей, иными словами, требования 98 водителей из 100 удовлетворялись с помощью одного или большего количества сортов производимого бензина. Использование октановых чисел, определенных по моторному методу, объясняется тем, что бензины для автомобилей 1972—1974 гг. характеризовались в большей степени именно ими.

Кривые (см. рис. 2) получены на основании исследований, проведенных на традиционном оборудовании CFR (Координационного исследовательского совета), которое в связи с использова-

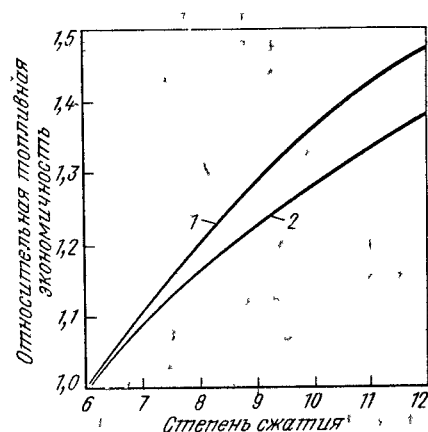


Рис. 1 Зависимость относительной топливной экономичности от степени сжатия

1 — равномерное движение по ровной дороге со скоростью 64,4 км/ч, 2 — среднестатистическое движение (80% от движения по ровной дороге)

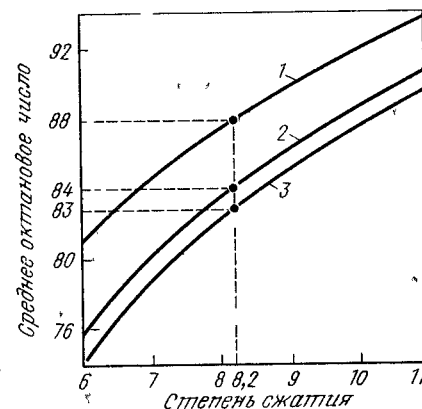


Рис. 2 Влияние среднего октанового числа бензина, определяемого по моторному методу, на степень сжатия при эксплуатации автомобильного парка на нескольких сортах бензина

1, 2, 3 — номера сортов бензина

нием неэтилированных бензинов было несколько модернизировано для оценки более высоких октановых чисел.

Чтобы обеспечить требования 98% водителей, для моделей автомобилей 1972—1975 гг. со средней степенью сжатия 8,2 требуется бензин с октановым числом по моторному методу 88. В то же время при эксплуатации автомобильного парка на двух сортах бензина ту же степень сжатия можно обеспечить с помощью бензина со средним октановым числом по моторному методу всего 84. При эксплуатации автомобильного парка на трех сортах бензина эта цель достигается при среднем октановом числе бензина по моторному методу 83. Соотношение сортов бензина в этом варианте составляет бензин «премиум» (первосортный бензин) — 20% с октановым числом по моторному методу около 88, промежуточный сорт бензина — 38% с октановым числом по моторному методу около 83 и основной сорт бензина — 42% с октановым числом по моторному методу около 80.

Если работу с несколькими сортами бензина увязать с преимуществами, достигаемыми в типичном режиме движения за счет более высоких степеней сжатия, то можно построить кривую, которая отразит зависимость между экономией топлива и средним октановым числом или степенью сжатия. Эта кривая представлена на рис. 3. Она была использована для оценки возможности достижения экономии топлива на автомобиле.

Потребление энергии на нефтеперерабатывающем заводе для увеличения октанового числа. После оценки преимуществ от увеличения степени сжатия были произведены расчеты для определения возрастания потребления энергии нефтеперерабатывающими заводами при производстве неэтилированных бензинов с более высоким октановым числом. Модель нефтеперерабатывающего завода, использованная для этих расчетов, соответствовала заводу (на побережье Мексиканского залива) производительностью 23 850 м³ нефти в сутки. Производительность всех основных установок на заводе была стандартной. Модель завода и после повышения октанового числа неэтилированного бензина позволяла вводить новые установки для производства бензина, не изменяя при этом их эксплуатационные параметры в сравнении с основным вариантом.

Кроме исследований на гипотетической установке, было решено определить капиталовложения, эксплуатационную стоимость

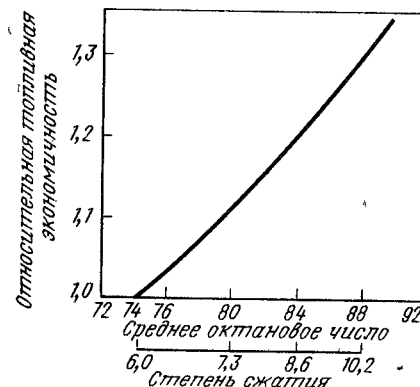


Рис. 3 Зависимость между средним октановым числом, определенным по моторному методу, и топливной экономичностью

Таблица 1 Основные варианты переработки нефти

Параметры переработки	Нефтеперерабатывающий завод			
	в Бейтауне	в Батон-Руже	в Бейвее	гипотетический
Объем переработанной нефти, м ³ /сут	90624	73135	47697	23849
Выход бензина, м ³ /сут	35773	37840	22259	11606
Октановое число по моторному методу бензина	82,8	83,6	81,9	82,9

и расход энергии, связанные с увеличением октановых чисел бензина на каждом из трех действующих нефтеперерабатывающих заводов, эксплуатируемых фирмой «Эксон» (США) в Бейтауне (штат Техас), в Батон-Руж (штат Луизиана) и Бейвее (штат Нью-Джерси).

Исходя из гипотетической окружающей среды, допускающей использование лишь неэтилированного бензина, при прогнозировании основного варианта производства неэтилированного бензина с требуемым октановым числом по моторному методу для всех четырех нефтеперерабатывающих заводов использовались программы линейного моделирования. Наряду с данными о поступлении нефти на переработку и о производстве бензина на каждом заводе полученные значения представлены в табл. 1. Из этой таблицы можно видеть значительное отличие октановых чисел по моторному методу бензинов, получаемых на каждом заводе, что является следствием ряда факторов, в том числе типа нефти и характеристики основного варианта установки.

В основном варианте производства автомобильного бензина с соответствующим октановым числом по моторному методу учитываются возможности усовершенствования на каждом заводе установки каталитического риформинга. Для получения бензинов с октановым числом выше базовых показателей требуется использование новых установок, производящих высокооктановые компоненты бензинов. В настоящей работе предполагалось использование новых установок, доступных в настоящее время в промышленности, в том числе установок для однофазного процесса изомеризации легкого прямогонного лигроина, установок каталитического риформинга лигроина, установок для изомеризации прямогонного лигроина, плюс запатентованного процесса фирмы «Эксон». Учитывалось, что для удаления серы, азота и олефинов сырье для процессов каталитической изомеризации и каталитического риформинга предварительно должно подвергаться гидроочистке.

По мере того, как увеличивалось число установок, общая схема процессов переработки осложнялась, а в результате увеличивался расход энергии и снижался выход бензина на тонну исходного сырья. Однако, поскольку при повышении степени сжатия двигателя увеличивается экономия топлива, то общее производство бензина не подгонялось к базовому уровню исследованных

октановых чисел неэтилированных бензинов. Вместо этого регулировалось производство бензина исходя из октанового числа, которое требовалось в различных вариантах для поддержания на постоянном уровне общего километража пробега автомобилей. Расчеты увеличения расхода энергии производились по сравнению с особым вариантом. Полученные данные приводятся на рис. 4.

Чтобы выразить чистый энергетический эффект увеличения степени сжатия в двигателе, необходимо было «подгонять» каждый нефтеперерабатывающий завод к одинаковому начальному октановому числу. Для этого сделано допущение о том, что степени сжатия останутся постоянными на уровне 8,2. Если принять, что при такой степени сжатия и для удовлетворения 98% потребителей автомобильного парка должно использоваться три сорта бензина, то потребуется бензин со средним октановым числом по моторному методу 83. Подгоняя каждый из четырех нефтеперерабатывающих заводов к этому базовому показателю, можно получить кривые расхода энергии, представленные в нижней части рис. 5. Сопоставляя эти результаты с кривой 5 экономии топлива на автомобиле, полученной ранее и показанной в верхней части рис. 5, можно вычислить чистую экономию энергии от повышения степени сжатия. Экономия представлена четырьмя кривыми чистой экономии в верхней части рис. 5.

Из рассмотрения вначале кривых нефтеперерабатывающих заводов в Бейтауне, Батон-Руже и гипотетического завода можно видеть, что максимальной экономии энергии можно достичь при среднем октановом числе по моторному методу между 86 и 87, соответствующем степени сжатия примерно 9,4.

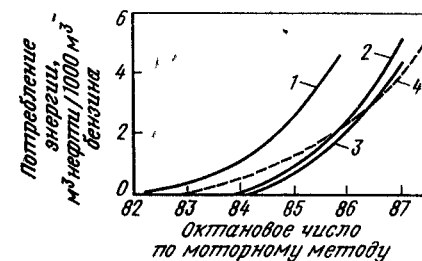


Рис. 4. Потребление энергии в процессе производства бензина нефтеперерабатывающими заводами:

1 — завод в Бейвее; 2 — завод в Батон-Руже; 3 — завод в Бейтауне; 4 — гипотетический завод

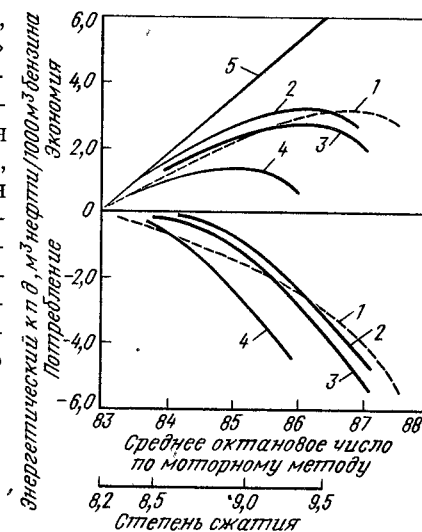


Рис. 5. Экономия потенциальной энергии нефти нефтеперерабатывающими заводами (под потреблением имеется в виду потребление энергии заводом):

1 — гипотетический завод; 2 — завод в Бейтауне; 3 — завод в Батон-Руже; 4 — завод в Бейвее; 5 — экономия за счет автомобиля

Это находится в основном в соответствии с результатами, полученными в 1971 г. Компанией по исследованию и разработкам фирмы «Эксон» [1], если октановые числа по исследовательскому методу, полученные во время тех испытаний, перевести в октановые числа по моторному методу.

Чистая экономия энергии, которой можно достичь путем изменения этого уровня октанового числа, составит от 2,8 м³ нефти на каждые 100 м³ бензина на заводе в Батон-Руж до 3,3 м³ нефти на 100 м³ бензина на заводе в Бейтауне. Как видно из рис 5, точка перегиба кривой завода в Бейвее значительно ниже точек перегиба для других заводов. Она находится на уровне октанового числа по моторному методу 84,5, соответствующему примерно степени сжатия 8,8 м³, и дает чистую экономию энергии всего 1,3 м³ нефти на 100 м³ бензина.

Так получается потому, что на бейвейском заводе начальные возможности увеличения среднего октанового числа по моторному методу были ниже, чем на других заводах.

Только для того, чтобы увеличить на этом заводе среднее октановое число бензина по моторному методу до 83, требовалось проведение более энергоемкого процесса, чем одноступенчатая изомеризация.

Относительно кривых по экономии энергии необходимо сделать несколько замечаний. Во-первых, они имеют тенденцию к быстрому снижению после прохождения точки перегиба. Во-вторых, отражают разницу максимальных уровней октанового числа бензина по моторному методу, достижимых на каждом нефтеперерабатывающем заводе. Получение бензина с более высоким октановым числом по моторному методу, чем эти максимальные уровни, исключало бы получение на заводах компаундированных автомобильных бензинов. Третье значительное замечание относительно кривых чистой экономии касается большой разницы между четырьмя заводами. Рассмотрение этих трех факторов свидетельствует о том, что принятие одного оптимального октанового числа бензина по моторному методу или одной степени сжатия двигателей для всей страны было бы очень сложной задачей. И если этот вопрос будет решен неправильно, то на некоторых нефтеперерабатывающих заводах нельзя будет получать бензин с октановым числом по моторному методу установленного уровня.

Установленная расчетным путем в этом исследовании экономия энергии может повышаться или понижаться в зависимости от некоторых факторов. К факторам, повышающим ее, можно отнести увеличение чувствительности к октановому числу по исследовательскому методу автомобилей моделей 1975 г. и последующих лет. Например, если в требованиях к дорожному октановому числу для новых автомобилей будет 25%-ная зависимость от октанового числа бензина по исследовательскому методу (а не нулевая зависимость, принятая в данном исследовании), то чистая экономия энергии, определенная расчетным путем для бейтаунского нефтеперерабатывающего завода, возрастет с 3,3 до

4 м³ нефти на 100 м³ бензина. К факторам, снижающим экономию, можно отнести необходимость ограничения содержания в отходящих газах автомобилей углеводородов и окислов азота при более высоких степенях сжатия.

Стоимость оптимизации октанового числа После определения чистой экономии энергии, которой можно достичь путем увеличения октанового числа, расчетным путем была определена эффективная стоимость сэкономленной нефти. Это было сделано с целью выявления относительной привлекательности увеличения степени сжатия по сравнению с типичной стоимостью нефти. Стоимость определялась для каждого нефтеперерабатывающего завода путем деления неэнергетической стоимости процессов по переработке нефти за вычетом 10% дохода на вложенный капитал для достижения экономии нефти. Экономия в долларах в 1975 г. колебалась от 133,22—125,79 долл. для гипотетического нефтеперерабатывающего завода и нефтеперерабатывающих заводов в Бейтауне и Батон-Руж до 188,69 долл. для нефтеперерабатывающего завода в Бейве. Это примерно в 1,5—2,5 раза больше современных цен как на импортную, так и на новую с неконтролируемыми ценами отечественную нефть.

Выводы Путем увеличения степени сжатия и октанового числа неэтилированного бензина можно добиться повышения экономии топлива, однако эффект этой экономии несколько снижается вследствие увеличения расхода энергии на нефтеперерабатывающем заводе. На основании исследований, проведенных на одном гипотетическом и трех действующих заводах, возможная чистая экономия нефти колеблется в пределах 1—3% от расхода бензина.

Экономия энергетических ресурсов за счет изменения соотношения между бензином и дизельным топливом В июле 1974 г. правительственная исследовательская лаборатория фирмы «Эксон» завершила исследование по изменению соотношения между автомобильными дистиллятными топливами и бензином [3]. Исследование, проведенное для Управления по охране окружающей среды, предполагало получение результатов для нефтеперерабатывающего завода, сооруженного на неподготовленной территории, и касалось экономии энергии в процессе производства при повышенном выходе автомобильных дистиллятов. Влияние доли производства дизельного топлива на экономию топлива показано на рис 6. Из рисунка видно, что снижение расхода энергии на проведение процесса при отношении автомобильного дистиллята к бензину 1:1 составляет 2%. Подчеркивая эту экономию энергии, мы не должны предполагать, что выход автомобильного дистиллята по сравнению с выходом бензина будет увеличиваться. В табл. 2 приводятся прогнозы потребности США в топливах согласно расчетам фирмы «Эксон». Указанный здесь

¹ Здесь и далее под дистиллятным понимается дизельное дистиллятное топливо — Прим. ред

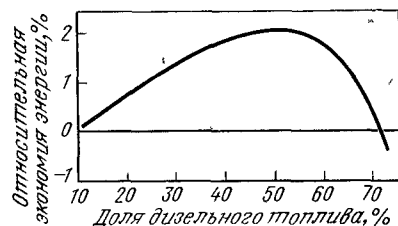


Рис. 6. Влияние увеличения доли автомобильного дизельного топлива на экономию энергии в процессе переработки нефти

автомобильному дистиллятному топливу в настоящее время составляет 10:1 (по теплоте сгорания). В будущем на новых нефтеперерабатывающих заводах оно может быть доведено до 1:1, но более реальным следует считать, что это отношение станет равным к 1990 г. 5 или 6:1.

Снижение требований к октановым числам. Фирма «Эксон» имеет контакт с Управлением по охране окружающей среды на увеличение степени сжатия двигателя без повышения требований к октановым числам бензина. В этой области мы работаем в трех направлениях: установка на борту автомобиля датчика детонации, который при обнаружении детонации уменьшает опережение зажигания; увеличение поверхности камеры сгорания для лучшей турбулизации топлива с воздухом в двигателе; использование форкамеры.

Мы также ведем поиск увеличения возможностей удовлетворения требований к детонационной стойкости топлива без повышения его октанового числа по линии снижения или изменения относительного значения октановых чисел по исследовательскому или моторному методам. Поиск ведется в направлении снижения температуры охлаждающей жидкости, регулирования момента зажигания, изменения отношения топлива к воздуху, модификации трансмиссии, что может снизить детонацию.

Выводы

Исследование целесообразности повышения октановых чисел бензина и степени сжатия двигателя показало, что затраты на повышение октановых чисел не являются перспективным путем

Таблица 2. Прогнозы потребления топлива в США

Вид топлива	1970	1980	1990
Бензин, м ³ /сут	922 142	1144 728	1287 819
Дистиллятное топливо, м ³ /сут	397 475	588 263	747 253

снижения зависимости США от зарубежной энергии. Согласно нашему мнению, некоторые изменения, частично касающиеся модификации системы выпуска отработавших газов, должны быть пересмотрены. Надо полагать, что в скором времени некоторые из этих изменений можно будет назвать. Наконец, мы считаем целесообразным, чтобы к 1990 г. дистиллятные топлива составили половину всех автомобильных топлив.

Обсуждение

Е. Е. Спитлер (Исследовательская компания «Шеврон»). У меня три вопроса. Вы противопоставили требования к октановым числам, предъявляемые потребителем, требованиям к октановым числам, определяемым экспертами. Хотелось бы знать, какую корректировку Вы делали?

Шеннон. Для того чтобы проще ответить на Ваш вопрос, рассмотрим два октановых числа. Их изменение вдоль всей полосы дороги не является постоянным.

Требования к октановому числу имеют тенденцию в конце концов сходиться.

Спитлер. Согласно нашим наблюдениям, «дорожные» октановые числа не обязательно совпадают один к одному с октановыми числами, определенными в лабораторных условиях, будь то октановые числа по моторному методу, используемые обычно в настоящее время, или какая-либо комбинация октановых исследовательских и моторных чисел. Повышение октанового числа по моторному методу на две единицы не обязательно означает необходимость увеличения на два пункта «дорожного» октанового числа. Принимали ли Вы во внимание эту разницу для высокооктановых неэтилированных бензинов?

Шеннон. Да, в пределах рассматриваемых нами октановых чисел эта разница учитывалась.

Спитлер. Учитывалось ли при определении экономии энергии с переходом на дизельное топливо снижение содержания серы в дизельном топливе?

Шеннон. Нет, содержания серы мы не учитывали.

Р. К. Пифли (Университет Санта-Клара). Какого рода альтернативами пользовались Вы для ограничения содержания загрязнений в отработавших газах?

Шеннон. До сих пор мы этим вопросом не занимались. В настоящее время мы пытаемся установить пригодность нашего метода. Нам пока еще не удалось создать совершенный замеряющий прибор. Прежде всего необходимо определить эмиссию данного двигателя. Для этого мы используем двигателем GM Чевинга 350 с системой каталитического дожигания. Мы надеемся также, что можно будет перекалибровать двигатель EGR, чтобы улучшить контроль содержания NO_x в отработавших газах. Нам надо посмотреть, насколько большими могут быть потери углеводородов с отработавшими газами двигателя и убедиться в том,

что катализатор дожигания может в достаточной степени ограничить их выброс в атмосферу.

Р. Т. Викерс (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Не можете ли Вы несколько подробнее рассказать о датчике детонации?

Шеннон. Датчик детонации сам по себе представляет простое устройство, это всего навсего акселерометр. По вопросу создания такого датчика мы вели переговоры со всеми производителями автомобилей, но только одна фирма «Делко Реми» откликнулась на нашу просьбу. Согласно мнению этой фирмы, можно модернизировать современную систему зажигания. С помощью сигнала, свидетельствующего о детонации двигателя, можно по импульсу, генерируемому в распределителе, строить зависимость: время—задержка зажигания. Однако датчиком регистрируются только ступенчатые изменения. Им можно пользоваться для систематического контроля, поскольку он будет уменьшать опережение зажигания на 3—4°. Если датчик продолжает указывать на детонацию, он может действовать и по другому контуру. Трудно сказать, сколько таких контуров потребуется. В какой-то точке во времени, если резко изменять задержку воспламенения, эта оценка окажется нереальной. Датчик — довольно простая вещь. Фирма «Делко Реми» считает, что им удастся создать систему с датчиком, которую можно будет включить в современную систему зажигания. Возможность использования акселерометра зависит от того, смогут ли наши инженеры с его помощью отличить действительную частоту детонации и ограничить ее. В прошлом такое устройство не использовалось.

А. Р. Сапре (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Вы говорили, что в будущем доля дизельного топлива, вероятно, возрастет. Изменится ли современное отношение стоимости дизельного топлива к стоимости бензина?

Шеннон. В этой модели мы не занимались вопросами стоимости, если не считать экономии энергии на новых нефтеперерабатывающих заводах, экономии капиталовложений и соответственно определения наиболее перспективного экономического и энергетического направления. При этом было установлено некоторое снижение стоимости — порядка 10%.

Билл Шапис (Из компании «Ричард П. Мюллер энд Ассошиейтс»). У меня два вопроса. Первый вопрос: какова примерная тепловая эффективность этих нефтеперерабатывающих заводов и имеются ли какие-либо возможности ее повышения? Второй вопрос: заметили ли Вы какие-либо значительные изменения в характеристике нефти, поступившей из одних и тех же районов в последние годы? Предвидите ли Вы какие-либо изменения их качества в будущем?

Шеннон. Говоря о высокой эффективности нефтеперерабатывающего завода, Вы подразумеваете 10% нефти, которые преобразуются в тепло. Для повышения тепловой эффективности нефтеперерабатывающего завода была проделана большая работа.

У нас есть нефтеперерабатывающий завод на западном побережье в районе Бениция, который настолько эффективен, что не может быть пущен в ход без внешнего воздействия. Он в такой степени связан с промежуточными холодильниками и другим оборудованием, что возникают трудности с использованием природного газа для пуска завода. Каждые 2 года, когда он останавливается для капитального ремонта, возникает проблема получения природного газа для его пуска. Что же касается качества нефти, то я не знаю, что Вы имеете в виду.

Шапис. Мне хотелось бы знать, изменится ли качество нефти, когда начнет поступать нефть, добываемая третичными методами?

Шеннон. Нет. В нашей гипотетической модели в одном варианте мы проводили эксперименты с арабской нефтью, а в другом — с нефтью из Южной Луизианы. Одна нефть была высокосернистой, а другая — малосернистой. И несмотря на то, что имеется разница по сравнению с другими неясными проблемами, с которыми приходится иметь дело, эта проблема относительно незначительна. В процессе производства бензина происходит настолько сильное перераспределение молекул, что влияние характеристики нефти невелико. Качество нефти будет иметь значение при производстве относительно более тяжелых продуктов или смазочных масел. При производстве же бензина образуются подобные молекулы независимо от исходного сырья.

Р. Х. Перри младший (фирма «Мобил рисёрч энд дивелопмент»). Вы показали, что путем повышения октанового числа по моторному методу достигается увеличение пробега автомобилей на кубометр нефти. В связи с этим у меня два вопроса. Первый вопрос: можете ли Вы прокомментировать, какую характеристику будет иметь получаемый Вами бензин, особенно в части испаряемости? Вопрос второй: каким будет соотношение других нефтепродуктов, получаемых из кубометра нефти, когда Вы увеличите октановое число бензина?

Шеннон. Требования к испаряемости соответствовали средним нормам для зимних и летних условий. Распределение и соотношение других нефтепродуктов оставалось постоянным.

Р. А. Хастид (Министерство транспорта США). Какие имеются потенциальные возможности повышения топливной экономичности с помощью устройства системы опережения зажигания, чувствительной к детонации? Будет ли эта система влиять на содержание загрязнений в отработавших газах?

Шеннон. Нашей целью на первом этапе является увеличение степени сжатия на октановую единицу. Нам кажется, что таким образом можно будет увеличить топливную экономичность на 5%. По некоторым немногочисленным данным можно полагать, что содержание в отработавших газах NO_x может возрасти на 20—25%. Более значительные изменения должны иметь место в содержании углеводородов. Мы не знаем, следует это принимать во внимание или нет. Этот фактор станет критическим при решении вопроса, является ли этот метод рациональным или нет.

ВОЗМОЖНОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

Е. М. ДЖОНСОН, У. Т. ТИРНЕЙ, Н. Р. КРОУФОРД
Фирма «Тексако, Инк.», штат Нью-Йорк, США

Наибольшей экономии энергии можно добиться при подходе к автомобилю, топливу и переработке нефти как к единой системе, а мерой оценки влияния различных комбинаций, составляющих эту систему, принять километраж пробега транспортных средств, приходящийся на кубический метр нефти. В этом случае можно достичь значительно большей экономии энергии, чем в любом другом варианте, и он заслуживает серьезного изучения. Наоборот, выбор ошибочного подхода значительно ограничит возможности производства автомобилей, эксплуатирующихся в условиях сокращенных ресурсов нефти.

Фирма «Тексако» завершила работу по оптимизации автомобилей, топлив, процессов переработки нефти и исследования влияния этих составляющих системы на экономию энергии. В процессе исследования изучался ряд комбинаций двигателей и топлив, как, например, бензиновые двигатели, работающие на этилированном и неэтилированном бензине, дизельные двигатели и перспективные газовые турбины. Кроме того, изучался двигатель, экономичность которого соответствовала экономичности дизельного двигателя, не предъявлявшего никаких требований к октановому или цетановому числу топлива и эксплуатировавшегося на топливе, выкипающем в пределах 38—344°C. Это был двигатель с непосредственным впрыском и послойным распределением топлива.

Результаты исследований показали, что наибольший расход топлива будет в случае продолжения производства автомобилей, работающих на неэтилированном топливе, в то время как наибольшие потенциальные возможности для экономии топлива сулит двигатель с непосредственным впрыском и с послойным распределением топлива.

Введение. В США все больше увеличивается разрыв между погрешностью нефти, природного газа и возможностями их удовлетворения за счет ресурсов страны. Примерно 77% всей используемой энергии получают из нефтепродуктов и природного газа. На долю нефтепродуктов приходится 45,9% потребляемой в стране энергии, 52% этого количества приходится на транспорт. В транспортном секторе около 39% всех нефтепродуктов расходуется легковыми автомобилями и легкими грузовыми автомобилями. Зависимость страны от нефти как основного источника энергии с конца прошлого века увеличивалась, в то время как использование других источников энергии сокращалось [1]. Такая тенденция была приемлема до тех пор, пока в стране производилось достаточное для удовлетворения своих потребностей количество нефти. К сожалению, это положение также изменилось. Добыча нефти в США не только перестала увеличиваться, а начала снижаться [1]. При ежесуточной добыче 1,6 млн. м³ нефти в стране потребляют ее около 2,6 млн. м³ в сутки, т. е. ежесуточный дефицит составляет 1 млн. м³ нефти, которая должна быть импортирована из-за рубежа. Этот дефицит исходя из разведанных запасов не уменьшится и в будущем. Нефть Северной Аляски и форсированные методы ее добычи могут служить лишь временной отдушиной.

Безусловно, принимаются меры для разработки других источников энергии. Однако, к сожалению, в этом направлении вряд ли

будут достигнуты значительные успехи до конца XX века. В течение двух следующих десятилетий США будут в еще большей степени зависеть от нефти, которая будет продолжать служить основным источником энергии. Поэтому необходимо не только продолжать поиск дополнительных запасов нефти в пределах географических границ страны, включая и внешний континентальный шельф, но и сохранять разведанные в стране запасы нефти.

Поскольку на легковые автомобили и легкие грузовые автомобили приходится такая большая доля потребления топлива, на них должно быть обращено основное внимание в поисках путей экономии энергии. Конгресс, признав это, потребовал повышения топливной экономичности новых автомобилей. Такое решение с первого взгляда может показаться логичным. Однако при более детальном изучении оказывается, что за ним скрываются «волчьи ямы», особенно, когда приходится считаться с правилами нормами по ограничению загрязнения окружающей среды и необходимостью повышения надежности и прочности автомобилей.

Повышения топливной экономичности автомобилей можно достичь за счет изменения только конструкции автомобиля, путем его модификации, например снижения массы автомобиля, снижения передаточных отношений трансмиссии и использования шин с радиальным кордом. Ослабление чрезмерно жестких требований к составу отработавших газов позволит создать двигатели с большим к. п. д. Кроме того, некоторые новые конструкции бензиновых двигателей также могут иметь более высокую топливную экономичность по сравнению с современными карбюраторными двигателями. Наибольшего эффекта в экономии топлива можно добиться на дизельных двигателях и двигателях с непосредственным впрыском и с послойным распределением заряда топлива.

При оптимальной комбинации усовершенствований можно добиться значительной экономии автомобильного топлива. К сожалению, однако, улучшение топливной экономичности двигателя и автомобиля связано с изменением требований к характеристике топлива, что может вызвать дополнительные потери топлива в процессе производства соответствующих его сортов. Такие потери могут быть больше, чем экономия, достигнутая за счет усовершенствования конструкции двигателя и автомобиля, и отрицательно сказаться на экономии топлива в целом. Поэтому очень важно вопрос об экономии топлива рассматривать комплексно в виде единой системы, состоящей из автомобиля, топлива и процесса его производства. Такой подход позволит определить общий километраж, достижимый на кубическом метре нефти. Этот показатель имеет значительно большее значение при оценке рационального использования энергии, чем километраж, пройденный на литре топлива.

Фирма «Тексако» для оценки разницы в километраже на кубический метр нефти исследовала ряд вариантов двигателей с раз-

личным расходом топлива и влияние их комбинаций на процессы переработки нефти.

В результате исследований были обнаружены потенциальные возможности экономии топлива, которые оказались больше, чем при любом другом методе.

Оптимизация системы «автомобиль (двигатель) — топливо — нефтеперерабатывающий завод» предусматривала исследование двигателей, топлив и нефтеперерабатывающих процессов. Прежде чем их рассмотреть во взаимосвязи, для выявления выгод, которые могут быть достигнуты системой в целом, каждый из этих элементов рассматривается отдельно.

Двигатели. Исследованию подверглись пять типов двигателей:

А. Карбюраторные, предназначенные для работы на этилированном бензине с октановым числом 96 по исследовательскому методу.

В. Карбюраторные, предназначенные для работы на неэтилированном бензине с октановым числом 91 по исследовательскому методу.

С. Дизельные, предназначенные для работы на дизельном топливе с цетановым числом 45.

Д. Двигатели с непосредственным впрыском и послойным распределением заряда топлива или другие двигатели, способные работать на топливе, выкипающем в пределах 38—344°C, к которым требования по октановому или цетановому числам не предъявляются. Топливная экономичность их примерно равна топливной экономичности дизельных двигателей.

Е. Гипотетический двигатель, по топливной экономичности, равный бензиновому двигателю, работающему на бензине с октановым числом 96 по исследовательскому методу, но способный работать и на дистиллатном топливе с пределами выкипания 38—344°C. Типичной конструкцией такого двигателя может служить газотурбинный двигатель.

Карбюраторные двигатели. Для исследования были выбраны двигатели образцов, типичных для периода до 1971 г. и работающих на этилированном бензине. В соответствии с информацией Горного бюро 1972 г. в качестве средневзвешенного октанового числа бензинов основного вида и «премиум» для моделей автомобилей 1971 г. и предшествующих лет было принято октановое число 96 по исследовательскому методу. Экономичность, которая достигалась на двигателе при работе на таком топливе, была принята равной 1, а экономичность топлива, достигавшаяся на двигателях других вариантов, сравнивалась с этим показателем.

В качестве норм на ограничение загрязнения окружающей среды токсичными соединениями отработавших газов (хотя общепризнано, что в будущем они должны измениться) были приняты нормы, установленные временным федеральным стандартом 1975 г., разрешающие следующие допустимые концентрации токсичных соединений, не более:

	г/км
Углеводороды (HC)	0,95
Оксид углерода (CO)	9,32
Оксиды азота (NO _x)	1,93

По нашим данным, нет публикаций, в которых бы непосредственно сравнивались различные типы двигателей с точки зрения удовлетворения требований этого стандарта. Однако в работах [2, 3] показано, что степень сжатия и детонационную стойкость топлива можно изменять, не оказывая значительного влияния на образование HC или NO_x, при некотором изменении в отработавших газах содержания CO. Однако в нашем случае было принято то, что и на образование CO оказывалось незначительное влияние.

В работе [2] показана зависимость между степенью сжатия двигателя и октановым числом топлива (рис. 1). Относительная топливная экономичность с учетом этой зависимости показана на рис. 2. В работах [4, 5, 6] приводятся дополнительные сведения относительно этой зависимости, однако, нам кажется, что при оценке относительной топливной экономичности эти данные не могут снизить значение сведений, полученных в настоящей работе.

Относительная топливная экономичность, установленная ранее и использованная в настоящем исследовании, приводится ниже при двух выбранных топливах для карбюраторных двигателей.

Дизели. Когда приходится сравнивать различные типы двигателей для легковых автомобилей, возникает целый ряд различных проблем. Особенно много проблем возникает при сравнении дизелей и бензиновых двигателей. Применявшийся раньше метод сравнения этих двигателей по объему рабочих цилиндров для настоящего исследования был бы непригоден вследствие того, что характеристика дизелей оказалась бы заниженной. Наиболее желательно делать вывод об относительной топливной экономичности, сравнивая двигатели одинаковой мощности. Сопоставление дизелей и бензиновых двигателей было несколько облегчено наметившейся недавно тенденцией снижения мощности бензиновых двигателей данного размера в связи с нормами, ограничивающими загрязнение окружающей среды [7]. Это привело к сокраще-

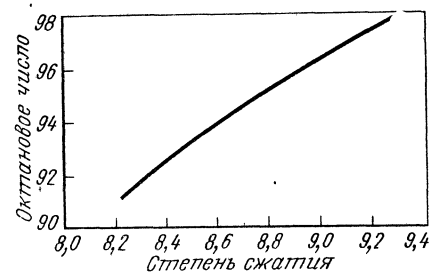


Рис. 1 Зависимость степени сжатия от октанового числа

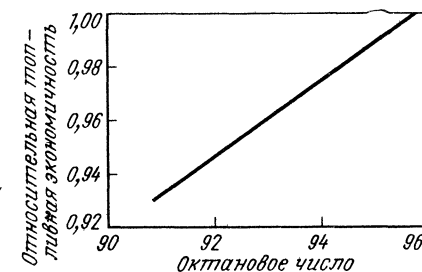


Рис. 2 Зависимость топливной экономичности от октанового числа

нию различия между мощностью и массой двигателя, традиционно существовавшего для дизелей и бензиновых двигателей. Кроме того, относительная топливная экономичность для двух типов двигателей может изменяться от практически незначительных величин при максимальной мощности до существенных преимуществ для дизелей при частичной нагрузке в условиях небольших скоростей транспортного средства. Если говорить в целом, то по топливной экономичности дизели превосходят бензиновые двигатели во всем диапазоне движения автомобиля. Возникает вопрос: насколько?

Согласно работе Бернс-Мосса [8], экономичность дизелей для будущих автомобилей будет на 30% выше бензиновых двигателей при сравнимых мощностях и в основном одинаковых циклах движения. Этот и другие [9] авторы указывают на то, что дизели смогут удовлетворять приведенным выше нормам, ограничивающим загрязнение окружающего воздуха.

Поэтому для дизелей был принят коэффициент относительной топливной экономичности, равный 1,3.

Двигатели с непосредственным впрыском и послойным распределением заряда топлива. Двигатели с непосредственным впрыском и послойным распределением заряда топлива могут быть сконструированы так, что не будут предъявлять требований к детонационной стойкости топлива, имея более высокую характеристику по топливной экономичности, чем соответствующие бензиновые двигатели. Кроме того, выполнение требований к топливу облегчается тем, что такие двигатели могут работать на топливах расширенного фракционного состава без снижения мощности. Исходя из долгосрочного прогноза для увеличения выхода транспортных топлив нормативы могут предусматривать получение вполне удовлетворительных топлив расширенного фракционного состава, выкипающих в пределах 38—344°C.

Двигатели с непосредственным впрыском и послойным распределением топлива имеют такие же размеры и массу, что и современные бензиновые двигатели, и в основном аналогичную конструкцию. Поэтому переход на эти двигатели не потребует коренной перестройки оборудования для их производства, если не считать системы впрыска топлива.

Вообще говоря, двигатели с непосредственным впрыском и послойным распределением топлива дают несколько меньшую мощность при максимальных нагрузках вследствие ограниченных возможностей использования воздуха по сравнению с бензиновыми двигателями тех же размеров. Однако в связи с тенденцией снижения мощности бензиновых двигателей для ограничения загрязнения окружающей среды и благодаря усовершенствованиям в области двигателей с непосредственным впрыском эта разница уменьшилась.

В настоящее время имеется несколько вариантов двигателей с непосредственным впрыском и послойным распределением заряда топлива [10]. Типичными их представителями являются двигатели с системой регулирования сгорания фирмы «Тексако», описан-

ные в работе [12]. В нашей работе для исследования были использованы образцы этих двигателей.

Характеристика двигателей с непосредственным впрыском и послойным распределением топлива хорошо документирована. При этом определялись и потенциальные возможности достижения эквивалентной мощности в сравнении с аналогичными карбюраторными двигателями [13]. Была подтверждена также большая топливная экономичность двигателей с системой регулирования горения фирмы «Тексако» как с естественным поступлением воздуха, так и с принудительным. Преимущество всегда оказывалось значительным и достигало иногда 70% по сравнению с эквивалентными бензиновыми двигателями, работающими в аналогичных условиях [13]. Топливная экономичность двигателей с системой регулирования горения фирмы «Тексако» была сопоставима с топливной экономичностью современных легковых автомобилей при испытаниях в течение 1975 г. по федеральному методу [14]

Исходя из этого, считаем, что на двигателях с непосредственным впрыском и послойным распределением заряда топлива по сравнению с бензиновыми карбюраторными двигателями достигается более высокая топливная экономичность (в среднем на 30%). Для этих двигателей относительная топливная экономичность была принята равной 1,3.

Кроме того, стендовые испытания показали, что двигатели с непосредственным впрыском и послойным распределением заряда топлива удовлетворяют нормам по ограничению загрязнения окружающей среды отработавшими газами: ~0,95 HC, 9,32 CO и 1,93 NO_x (в г/км) без каталитических дожигателей или других приспособлений. Дальнейшее подтверждение этого потребует проведения испытаний по программе федерального метода 1975 г.

Прочие двигатели. Исследованы также другие двигатели, которые могли бы работать на топливе, выкипающем в пределах 38—344°C, но при такой же топливной экономичности, что и бензиновые поршневые двигатели. К двигателям такого типа могут быть отнесены, например, будущие газотурбинные двигатели. Поэтому их относительная топливная экономичность была принята равной 1, предполагая при этом, что требования по предотвращению загрязнения окружающей среды будут удовлетворены.

Ниже приводится топливная экономичность для каждого из рассмотренных выше типов двигателей.

Тип двигателя	Относительная топливная экономичность
Двигатель, работающий на этилированном бензине с октановым числом 96 по исследовательскому методу .	1,0
Двигатель, работающий на неэтилированном бензине с октановым числом 91 по исследовательскому методу	0,93
Дизель	1,3
Двигатель с непосредственным впрыском и послойным распределением заряда топлива	1,3
Прочие двигатели будущего	1,0

Таблица 1 Нормативы на топливо

Характеристика топлива	Этилированный бензин «премиум»		Этилированный основной бензин		Неэтилированный бензин	
	не менее	не более	не менее	не более	не менее	не более
Октановое число по исследовательскому методу	99,8	—	94,0	—	91,0	—
Октановое число по моторному методу	92,2	—	86,4	—	83,0	—
Содержание свинца, г/л	—	0,655	—	0,517	—	—
Плотность	—	—	0,72	0,76	—	—
Упругость паров по Рейду, мм рт ст	—	—	—	555	—	—
Перегоняется до 71°C, %	—	—	24,0	40,0	—	—
Перегоняется до 110°C, %	—	—	55,0	64,0	—	—
Перегоняется до 182°C, %	—	—	90,0	100,0	—	—

Характеристика топлива	Дизельное топливо № 2 дистиллятное		Топливо, выкипающее в пределах 38—344°C	
	не менее	не более	не менее	не более
Содержание серы по массе, %	—	0,222	—	0,10
Температура вспышки, °C	60,0	90,0	—	—
Температура застывания, °C	—	—6,7	—	—
Цетановое число	45,0	—	—	—
Плотность	0,835	0,860	—	—
Упругость паров по Рейду, мм рт ст	—	—	—	622
Перегоняется до 204°C, %	2,0	10,0	—	—

Моделирование топлив и заводов, их производящих Технические требования к топливам. С целью максимального производства различных видов топлива необходимо было установить для них расчетные нормативы, которые могли бы удовлетворять требованиям ранее описанных типов двигателей. Используемые нормативы на топливо представлены в табл. 1. Нормативы на бензин и дизельное топливо составлены на основании данных Горного бюро [15] на 1972 г. Для бензина были приняты усредненные требования к зимнему и летнему сортам. Для топлива широкого фракционного состава требовалось нормирование только по содержанию серы и по упругости паров.

После того, как были выбраны типы двигателей и топлив, необходимо было определить модель нефтеперерабатывающего завода, на котором можно производить максимальное количество топлива каждого из выбранных типов и установить исходный уровень, с которым можно сравнивать переработку нефти на заводах других моделей.

Система моделирования нефтеперерабатывающего завода. В качестве основного года для разработки модели был выбран 1972 г., поскольку для него имелись доступ-

ные сведения о поступлении сырья и выходе нефтепродуктов [15, 16]. В США были опубликованы сведения о производительности каждого завода [17], имелась также информация о стоимости нефти [16] и средней стоимости нефтепродуктов [18, 19, 20]. Кроме того, 1972 г. был последним годом, когда производство малозетилированного и неэтилированного бензина не оказало существенного влияния на производство этилированных бензинов, и поэтому его можно было взять в качестве исходного года для сравнения.

В исследовании была использована моделирующая система линейного программирования. Эта система наряду с программой ЭВМ содержит большой набор данных относительно многих моделей нефтеперерабатывающих заводов, нефти и различных данных о физических свойствах каждого заводского потока. Модель каждого процесса является линейным выражением нефтеперерабатывающей установки.

Полная модель нефтеперерабатывающего завода была сделана по программе модульным способом.

Программа, составленная на основании информации, поступающей от потребителя и из других данных, определила систему линейных уравнений (модель), отражающих возможные поступления на нефтеперерабатывающий завод, выходы нефтепродуктов и последовательность операций по переработке нефти. Решение системы этих уравнений позволило определить максимальные выгоды.

Моделирование основного варианта Модель нефтеперерабатывающего завода и производственные мощности его установок были приняты с параметрами, соответствующими заводам 1972 г., сведения о которых были опубликованы в журнале «Ойл энд Гас Дж» 2 апреля 1973 г. Состав поступающего на переработку сырья и выход продуктов переработки соответствуют данным Горного бюро [16]. Мощность принятого за основную модель нефтеперерабатывающего завода равна 15 900 м³ в календарные сутки (кал сут) — типичная мощность для нефтеперерабатывающих заводов 1972 г.

Нефтеперерабатывающие установки на заводе и их производительность приводятся в табл. 2.

Таблица 2 Мощность нефтеперерабатывающих установок

Процесс переработки	Мощность установок, м ³ /кал сут	Процесс переработки	Мощность установок, м ³ /кал сут
Прямая перегонка		Коксование	827
атмосферная установка	15 900	Гидрокрекинг	358
вакуумная »	7 155	Гидроочистка дистиллятов	635
Гидроочистка бензина	3 045	Криогенная очистка водорода, м ³ /сут	331 309
Каталитический риформинг	3 022	Выход серы, т/сут	24
» крекинг	5 030		
Алкилирование	358		

Таблица 3. Максимальное производство транспортного топлива при переработке 15 900 м³/сут нефти

Характеристика	Вариант			
	А	В	С	Д
	Основной	Октановое число по исследовательскому методу 91 (по моторному методу 83)	Максимальный выход дизельного топлива	Максимальный выход топлива, выкипающего в пределах 38—344°C
Выход, м³/кал. сут				
А. Топливо для нефтеперерабатывающих заводов:				
1. Топливный газ	232,3	262,2	186,3	155,0
2. Пропан-пропиленовая фракция	30,4	384,7	14,0	—
3. Котельное топливо № 6	719,6	567,3	659,8	636,8
4. Кокс (1141,2 кг/м³)	250,4	262,7	173,9	165,5
Итого	1 232,7	1 476,9	1 034,0	957,3
В. Транспортные топлива:				
5. Бензин «премиум»	3 324,5	—	2 223,7	—
6. Основной бензин	5 396,7	—	4 746,3	—
7. Неэтилированный бензин	—	8 388,2	—	—
8. Дизельное топливо	1 610,8	1 610,7	2 758,3	1 610,7
9. Топливо, выкипающее в пределах 38—344°C	—	—	—	—
Итого	10 332,0	9 998,9	10 428,3	10 611,0
С. Остальные нефтепродукты:				
10. Реактивное топливо	1 446,8	1 446,8	1 446,8	1 446,8
11. Котельное топливо для обогрева помещений	2 170,4	2 170,4	2 170,4	2 170,4
12. Нефтехимические продукты и специальная нефть	540,6	540,6	540,6	540,6
13. Смазочные масла и парафин	286,2	286,2	286,2	286,2
14. Асфальт и дорожные масла	524,6	524,6	524,6	524,6
Итого	4 968,6	4 968,6	4 968,6	4 968,6
Д. Прочие топлива (кокс, сжиженные нефтяные газы, котельные топлива № 4, 5, 6)	1 334,2	1 361,1	1 332,1	1 333,6
Всего	16 867,5	17 805,5	17 763,0	17 870,5

Определение основного варианта модели нефтеперерабатывающего завода, который отражал бы всю нефтеперерабатывающую промышленность страны, было делом нелегким. При переработке на нефтеперерабатывающем заводе модели 1972 г. сырья среднего состава получают нефтепродукты, приведенные в табл. 1. Предусматривается производство топлив различных сортов для транспортных машин с различными двигателями. Речь идет лишь о наземных машинах.

Варианты и результаты исследований. Для определения возможностей максимального производства транспортных топлив исследовано четыре варианта работы нефтеперерабатывающих заводов, в том числе:

А. Производство топлив, соответствующих нормативам 1972 г.

В. Производство неэтилированного бензина с октановым числом по исследовательскому методу 96.

С. Производство дизельного топлива.

Д. Производство топлив, выкипающих в пределах 38—344°C, без ограничения октановых и цетановых чисел.

Эксплуатационные условия для модели нефтеперерабатывающего завода имели определенную свободу и ограничения. Поступление сырья поддерживалось во всех случаях постоянным — равным 15 900 м³/кал.сут. Допускалось увеличение мощности установок каталитического риформинга для производства неэтилированного бензина. Была также установлена необходимость поддержания производства и других требовавшихся нефтепродуктов. В связи с этим выходы нефтехимического сырья, специальной нефти, остаточного котельного топлива, авиационного реактивного топлива, смазочного масла, парафина поддерживались в каждом варианте на одинаковом уровне.

В табл. 3 обобщаются результаты для каждого исследовавшегося варианта и распределение выходов для основного и альтернативных нефтеперерабатывающих заводов с номинальной мощностью 15 900 м³/кал.сут (1972 г.), перерабатывающих нефть среднего качества.

Основной вариант (вариант А). Основной вариант завода производительностью 15 900 м³/кал.сут типичен для нефтеперерабатывающей промышленности США в 1972 г. В то время производились в основном этилированные бензины и дизельные топлива. Выход бензина составлял 8721 м³/кал.сут, а дизельного топлива — 1611 м³/кал.сут. Общее производство транспортных топлив составляло 10 332 м³/кал.сут. Кроме того, производились также и другие нефтепродукты, приведенные в табл. 3, использовавшиеся в качестве топлив. Основной вариант будет применен для сравнения с выходами трех других процессов производства топлив различного типа.

Энергия, необходимая для эксплуатации нефтеперерабатывающего завода основного варианта, равна 12 650 млн.ккал/сут, или 795 700 ккал на 1 м³ нефти. Потребность же энергии для работы нефтеперерабатывающего завода в 1972 г. по данным Горного

бюро была равна 1077 500 ккал на 1 м³ нефти. Виды топлива, использовавшиеся для переработки на основном варианте нефтеперерабатывающего завода, показаны в табл. 3. В табл. 3 приводится также аналогичная информация для заводов других вариантов.

Неэтилированный бензин с октановым числом по исследовательскому методу 91 (вариант В). Неэтилированный бензин с октановым числом 91 по исследовательскому методу вырабатывался в максимально возможном количестве.

Для достижения этой цели необходимо было увеличить на 20,8% мощность каталитического риформинга по сравнению с мощностями, использовавшимися в основном варианте, что обеспечило бы производство бензина с октановым числом по исследовательскому методу 100, а также работу установки по гидроочистке. В связи с увеличением мощности каталитического риформинга потребовалось дополнительное сырье — прямогонный лигроин, выкипающий в пределах 63—93°C, а также гексаны и гептаны из газового конденсата. Была увеличена подача сырья на коксующую установку и на установку крекинга с флюидизированным катализатором. Для удовлетворения требований нормативов по сере перерабатываемые дистилляты подвергались гидроочистке.

В итоге получалось 8388 м³/кал. сут неэтилированного бензина с октановым числом 91 по исследовательскому методу, что на 333 м³/кал. сут меньше, чем при производстве бензина по основному варианту. Размеры производства дизельного топлива в обоих случаях были одинаковыми.

Из сравнения можно видеть недостатки, связанные с производством неэтилированного бензина. Кроме того, как было ранее отмечено, двигатель на бензине с меньшим октановым числом работает с меньшим к. п. д.

Энергия, требующаяся для обеспечения работы завода по получению неэтилированного бензина с октановым числом 91 (вариант В), составляла 14,5 млрд. ккал/сут, или 911 400 ккал на 1 м³ нефти.

Максимальное производство дизельного топлива (вариант С). Для производства максимального количества дизельного топлива средние дистилляты нефти направлялись непосредственно на смешение, а не на установку крекинга с флюидизированным катализатором для получения бензина. Объем переработки средних дистиллятов на установке каталитического крекинга с флюидизированным катализатором был уменьшен с 67,1% в основном варианте до 58,7% в данном варианте.

Программа ЭВМ, составленная для исследования этого вопроса, основывалась на идеальном фракционировании, и, если бы не ограничения, с ее помощью можно было бы производить 50,8% средних дистиллятов. При менее четкой дистилляции, чем это можно было бы делать на типичном нефтеперерабатыва-

щем заводе, общий выход среднестиллятных фракций составлял бы 40% от нефти.

Из табл. 3 можно видеть, что нельзя производить дизельное топливо, исключив производство бензина полностью. В данном варианте этилированный бензин получался по тем же нормативам, что и в основном варианте.

Ниже сопоставляется производство дизельного топлива и бензина нефтеперерабатывающими заводами двух вариантов.

	Выход бензина, м ³ /кал сут	Выход дизель- ного топлива, м ³ /кал. сут
Основной вариант	8721	1611
Вариант С	7670	2758
Разница	—1051	+1147

В варианте С по сравнению с основным вариантом производство дизельного топлива значительно возросло. Если говорить об увеличении пробега транспорта, который может быть достигнут при работе на дизельных двигателях, то этот вариант обеспечит больший пробег транспорта, чем любой из бензиновых вариантов, рассмотренных ранее.

Кроме того, как видно из нижеследующего, меньше энергии требуется для эксплуатации нефтеперерабатывающего завода.

	Топливо, потребляемое заводом, ккал/м ³ нефти
Основной вариант	795 700
Вариант С	686 307

Максимальное производство топлива широкого фракционного состава, выкипающего в пределах 38—344°C (вариант D) Фракция, выкипающая в пределах 38—344°C, которая может быть использована в качестве топлива для двигателя с непосредственным впрыском и послойным распределением заряда топлива, не характеризуется октановым или цетановым числами. Загрузка сырьем обычных установок каталитического риформинга с целью максимального производства топлива этого типа была доведена до размеров, при которых образующийся водород обеспечивает работу установок гидроочистки и гидрокрекинга (соответственно 1 902 и 3 022 м³/кал. сут в основном варианте). Кроме того, требования к работе установки каталитического риформинга (жесткость) были снижены исходя из производства бензина с октановым числом по исследовательскому методу 86,2.

В будущем, возможно, будет нежелательно или неэкономично производить компоненты широкофракционного топлива с целью получения на установках каталитического риформинга водорода. Для производства водорода могут быть использованы другие методы. В будущих исследованиях необходимо сравнить стоимостную характеристику производства водорода различными методами и выбрать наиболее экономичный процесс.

Для дальнейшего увеличения производства топлива широкого фракционного состава загрузка установки каталитического крекинга (флюид) была снижена с 5030 м³/кал. сут в основном варианте до 3903 м³/кал.сут. Снижение загрузки установки осуществлялось за счет направления потока дистиллята непосредственно на компаундирование топлива 38—344°C.

Ниже показано общее производство транспортного топлива в сравнении с основным вариантом.

	Основной вариант	Вариант D
Бензин, м ³ /кал. сут	8 721	—
Дизельное топливо, м ³ /кал. сут	1 611	1 611
Топливо, выкипающее в пределах температур 38—344°C, м ³ /кал. сут	—	9 000
Всего	10 332	10 611

В варианте D получается 10 611 м³/кал. сут транспортных топлив, которые при использовании в двигателях с непосредственным впрыском и послойным распределением заряда топлива обеспечивают максимальный пробег, считая на кубический метр нефти, что будет показано в следующем разделе настоящего доклада.

Для производства транспортного топлива 38—344°C требуется меньше энергетического топлива, поскольку процесс его производства проходит при меньшей загрузке и жесткости установок каталитического риформинга и каталитического крекинга. Ниже приводится достигаемая экономия энергии по сравнению с основным процессом:

	Топливо, потребляемое заводом, ккал/м ³ нефти
Основной вариант	795 700
Вариант D	595 962

Сохранение энергетических ресурсов. Автомобильное топливо 80-х годов по всей вероятности также будет производиться из нефти. Сохранение ресурсов нефти поэтому имеет чрезвычайно важное значение. Доминирующее влияние на нефтяные ресурсы страны и сокращение импорта недостающей нефти оказывает выбор типа автомобильного двигателя, применяемого топлива и процессов его получения. В табл. 4 приводятся результаты расчетов для различных соотношений этих параметров. Из таблицы видно количество нефти (под нефтью понимается нефть и газовый конденсат), из которой получают топливо, необходимое для обеспечения определенного пробега автомобилей. Недостающее количество восполняется импортной нефтью, уменьшение дефицита указывает на сокращение зависимости от импортной нефти.

Вариант А в таблице — основной вариант, отражающий фактические данные, относящиеся к 1972 г., когда перерабатывалось 1,84 млн. м³ нефти в сутки [16] для получения этилированного бензина и дизельного топлива, которыми обеспечивались пробег транспорта в 6982 млн. км в сутки и экономия в среднем

Таблица 4 Взаимосвязь системы «автомобиль (двигатель) — топливо — нефтеперерабатывающий завод»

Вариант	Пробег, км/сут	Пробег транспорта на кубический метр нефти, км/м ³	Нефть, м ³ /кал. сут		
			требуется	производится в США	недостаток или избыток
А. Этилированный бензин	6982	3491,4	1996,1	1783,9	213,0
В Бензин неэтилированный с октановым числом 91 по исследовательскому методу	6982	3198,0	2178,2	1783,9	394,3
С. Дизельное топливо	6982	3623,0	1922,2	1783,9	138,3
Д Топливо для двигателей с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда	6982	4452,8	1564,5	1783,9	(219,4)
Е Газотурбинное топливо	6982	3612,8	1928,5	1783,9	144,7

5,34 км/л топлива [22] по отношению ко всему бензину, израсходованному в том же году. Порядок расчетов, относящихся к определению пробега автомобилей, приводится ниже.

Порядок расчета пробега транспортных автомобилей и потребности в нефти:

Основной вариант (1972 г., этилированный бензин):

1 8721 м³ дизельного топлива/сут × 1000 л/м³ × 5,13 км/л × 1,0 (относительный топливный к п д) = 44 743 тыс. км/сут; 1611 м³ дизельного топлива/сут × 1 000 л/м³ × 5,13 км/л × 1,3 (относительный топливный к. п. д.) = 10 743 тыс км/сут. Итого получим 55 486 тыс км/сут

2 50 763 тыс. км/сут: 15 900 м³ нефти/сут = 3 198 км/пробега/м³

3. 3 491 км/м³ × 2 млн. м³ нефти, переработанной в США в 1972 г/сут = 6 982 млн км пробега/сут

Прочие варианты

Например, применение неэтилированного бензина с октановым числом 91 по исследовательскому методу.

1. 8388 м³ бензина с октановым числом по исследовательскому методу 91/сут × 1 000 л/м³ × 5,13 км/л × 0,93 (относительный топливный к. п. д.) = 40 020 тыс. км/сут;

1 611 м³ дизельного топлива/сут × 1 000 л/м³ × 5,13 км/л × 1,3 (относительный топливный к п д.) = 10 743 тыс. км/сут. Итого получим 50 763 тыс. км/сут.

2 50 763 тыс. км/сут: 15 900 м³ нефти/сут = 3 198 км/пробега/м³.

3. Для получения суммарного пробега (км/сут) в США, как в основном варианте (6 982 млн. км), требуется:

6 982 млн км/сут: 3 198 км/м³ = 2 178 тыс. м³ нефти/сут.

В последующих вариантах эти 6982 млн. км/сут были приняты в качестве стандартного показателя, который использовался для сравнения экономии топлива при различной комбинации двигателей и топлив. Очевидно, что в зависимости от типа двигателей и топлив потребность в нефти значительно менялась

Наибольшее количество нефти для обеспечения пробега автомобилей 6982 млн. км/сут требовалось в варианте с неэтилированным бензином (вариант С), когда его производство было максимально увеличено. Этого направления США придерживаются и в настоящее время. Автомобили, работа которых отвечает стандартам по предотвращению загрязнения окружающей среды, оборудуются каталитическими дожигателями, а на нефтеперерабатывающую промышленность возложена задача не повреждать катализатор и производить бензин с октановым числом 91 по исследовательскому методу. В результате этого, по сравнению с основным вариантом, был снижен пробег автомобилей с 3492 до 3198 км на 1 м³ перерабатываемой нефти. Кроме того, потребность в нефти возросла с 2000 до 2178 тыс. м³/сут.

В этом исследовании можно было исходить только из процессов переработки нефти, которые предусмотрены основным вариантом. Однако путем модификации существующих процессов можно добиться изменения выхода бензина. Этот вопрос также изучался. Один из вариантов касался изучения вопроса потенциальных возможностей производства бензина с октановым числом 94 по исследовательскому методу. Для этого был принят простой вариант, по которому увеличение пробега автомобиля, приходящееся на кубический метр нефти и достижимое за счет изменения двигателя, осуществлялось на бензине, полученном из прямых фракций, подвергнутых каталитическому риформингу в очень жестких условиях. Однако даже при использовании максимального количества сырья для установок каталитического риформинга с жестким режимом можно добиться лишь незначительного повышения качества неэтилированного бензина с октановым числом 91 по исследовательскому методу. Повышение же эффективности, которое достигалось за счет модификации конструкции двигателя, в значительной мере сводилось на нет из-за увеличения потребности в топливе с более высоким октановым числом. Поэтому мы уверены, что путь, связанный с увеличением октанового числа неэтилированных бензинов, не сулит никаких потенциальных возможностей повышения транспортной эффективности. Таким образом, выводы, сделанные в данной работе относительно двигателей таких типов, как дизельные и с послойным распределением топливного заряда, остаются в силе.

Увеличения пробега транспорта на кубический метр нефти можно достичь путем производства максимального количества дизельного топлива с бензиновой фракцией, требующейся для производства этилированного, а не неэтилированного бензина. Это видно из варианта В, в котором увеличение пробега, приходящееся на кубический метр нефти, достигает 576 км и потребность в нефти для обеспечения пробега в 6982 млн. км в сутки составляет 1922 тыс. м³/сут.

Интересно отметить, что с помощью газотурбинного двигателя будущего (вариант Е) обеспечивается примерно такое же увеличение пробега автомобилей, как и в варианте с дизелем (вари-

ант С). Однако для варианта Е будет служить топливо широкого фракционного состава, выкипающего в пределах 38—344°C, как и для двигателя с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда.

Наибольшее увеличение пробега автомобильного транспорта можно достичь в варианте D, в котором используется двигатель с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда.

При этом достигается увеличение пробега автомобильного транспорта, равное 708 км на кубический метр нефти, и для переработки требуется меньше нефти, чем в любом другом варианте.

Разницу между различными вариантами, рассмотренными выше, наглядно можно видеть на рис. 3. На рисунке показано, что двигатель с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда, превосходящий другие типы двигателей по топливной экономичности, обладает 35%-ным потенциалом по увеличению пробега автомобилей на кубический метр нефти в сравнении с двигателями, которые будут работать на неэтилированном бензине с октановым числом 91 по исследовательскому методу. Кроме того, вариант с двигателями непосредственного впрыска и послойного распределения топливного заряда был единственным, который облегчал решение проблемы сокращения зависимости транспорта от импортной нефти. И, напротив, варианты, связанные с максимальным использованием дизельных и будущих газотурбинных двигателей, дают возможность немедленно добиться увеличения пробега автомобилей на кубический метр нефти, но не позволяют решить проблему дефицита нефти.

Наряду с приведенными выше факторами необходимо учитывать и ряд других важных соображений, связанных с системой «автомобиль (двигатель)—топливо — нефтеперерабатывающий завод», которые нельзя оставлять без внимания.

Готовность страны к возможным ограничениям в потреблении нефти и к экономии энергии — связанные между собой проблемы. Предположим, например, что если в будущем добыча нефти в США не превысит добычу 1972 г. (1784 тыс. м³/кал. сут), то пробег автомобилей по варианту В (неэтилированный бензин с октановым числом 91 по исследовательскому методу) снизится на 18%, в то время как по варианту D (с двигателем с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда) мог бы возрасти примерно на 14%. Разница между этими двумя вариантами, составляющая около 32%, представляет собой достижимые возможности увеличения пробега автомобилей

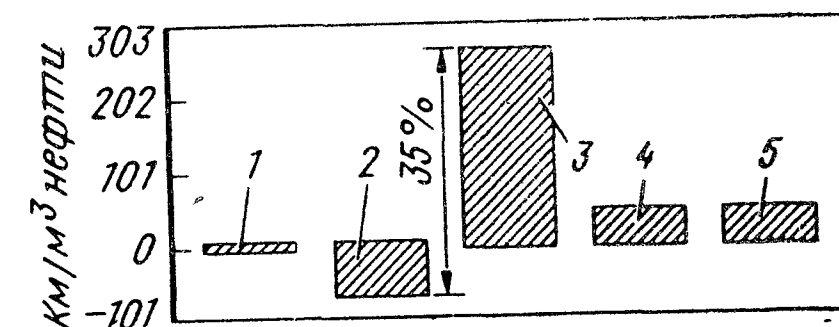


Рис. 3. Система «автомобиль (двигатель) — топливо — нефтеперерабатывающий завод»:

1 — этилированный бензин; 2 — неэтилированный бензин с октановым числом 91 по исследовательскому методу; 3 — топливо для двигателей с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда; 4 — дизельное топливо; 5 — газотурбинное топливо

по сравнению с современной практикой использования двигателей и топлив. К выигрышу следует добавить и другие возможности экономии топлива, достижимые за счет факторов, не имеющих отношения к конструкции двигателя, роль которых в дальнейшем будет все возрастать. Короче говоря, преимуществом двигателей с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда является то, что при их использовании можно будет заправить топливом больше автомобилей и увеличить пробег автомобилей, если в будущем ресурсы нефти станут ограниченными.

Необходимо обратить внимание также на другое преимущество варианта с такими двигателями. Более половины нефтеперерабатывающих заводов США являются заводами малой мощности (производительностью менее 7950 м³/кал сут). Для этих нефтеперерабатывающих заводов радикальная перестройка с изменением технологического процесса, возможно, будет экономически неосуществимым делом, поскольку это приведет к сокращению или полному прекращению производства. С таким положением страна вряд ли может согласиться. Переход в дальнейшем на двигатели с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда с использованием топлива широкого фракционного состава даст возможность продолжать эксплуатировать даже маленькие нефтеперерабатывающие заводы, причем с меньшими затратами по сравнению с другими процессами, потребляющими больше энергетического топлива.

В итоге удовлетворение наших будущих потребностей в энергии для транспорта с помощью интегрированной системы «автомобиль (двигатель) — топливо—нефтеперерабатывающий завод» принесет выгоды производителям энергии и автомобилей, потребителям топлива и правительству, обеспечив более высокую степень энергетической самообеспеченности страны.

Учитывая вышесказанное, а также связанные с этим возможности экономии, мы считаем, что система «автомобиль (двигатель) — топливо — нефтеперерабатывающий завод» заслуживает серьезного внимания.

Нефтеперерабатывающие заводы в будущем. К сложностям, которые возникли в связи с настоящим исследованием, можно отнести то, что приходилось исходить из современных нефтеперерабатывающих заводов. Однако если на нефтеперерабатывающих заводах будет вырабатываться фракция 38—344°C для производства автомобильного топлива, то структура новых заводов может быть совершенно иной. Такие процессы, как каталитический риформинг, крекинг и алкилирование могут не потребоваться, поскольку нормативами не будут предъявляться требования к топливу по октановым и цетановым числам. Однако водород для обессеривания все же потребуется. Поэтому если водород не будет производиться в процессе каталитического риформинга, то его придется получать каким-либо иным способом. Экономическая целесообразность получения водорода на установках каталитиче-

ского риформинга или иными способами будет зависеть от будущей конъюнктуры.

Учитывая неопределенности в области проектирования будущих нефтеперерабатывающих заводов, мы не предпринимали попыток по созданию модели завода, специально предназначенного для производства максимального количества топлива, выкипающего при 38—344°C.

ВЫВОДЫ

На основании изложенного были сделаны следующие выводы:

1. Для обеспечения энергией экономики США в условиях уменьшающихся ресурсов и увеличивающейся стоимости нефти требуется добиться увеличения величины пробега транспорта на кубический метр нефти.

2. Максимальный пробег на кубический метр нефти и минимальные потери энергии при производстве топлива из исследованных вариантов обеспечивают двигатель с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда и топливо для него, выкипающее в пределах 38—344°C.

3. Минимальный пробег на кубический метр нефти имеет место в варианте, в котором двигатель внутреннего сгорания работает на неэтилированном бензине.

4. Переход на использование для автомобилей двигателей с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда даст возможность значительно сократить импорт нефти.

ОБСУЖДЕНИЕ

Р. М. Кампо (фирма «Форд мотор»). У меня имеются два вопроса, касающиеся двигателей с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда. Можете ли Вы сказать, какой отработавший газ поступит в каталитический дожигатель или выйдет из него, обеспечит ли двигатель требования к ограничению загрязнения окружающего воздуха в соответствии со стандартом: 0,95 HC, 9,32 CO и 1,93 NO_x г/км? Второй вопрос: производились ли какие-либо расчеты относительно капиталовложений, которые потребуются для производства таких двигателей?

Джонсон. На первый вопрос ответить легче. Мы не занимались вопросами оптимизации двигателя с точки зрения удовлетворения требованиям стандарта к содержанию токсичных компонентов в отработавших газах. Однако на основании стендовых испытаний мы считаем, что эти показатели достижимы без каталитического дожигания. Это, по-видимому, максимум, чего можно достичь. Что касается второго вопроса, то мы не оценивали стоимости производства подобных двигателей. Однако, по нашему мнению, переход на двигатели с непосредственным впрыском и

послойным распределением топливного заряда не будет связан с какими-либо трудностями, так как для этого требуется изменить головку цилиндра, поршни и использовать систему впрыска топлива, применяемую в дизельных двигателях.

Дж. Б. Бидвелл (фирма «Дженерал моторс рисёрч лэборэтриз»). Мне кажется, что Вы стали защитниками двигателя независимо от используемого топлива. Иными словами, если бы я смог сделать двигатель, который бы работал на неэтилированном бензине и имел такой же к. п. д., как и двигатель с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда, используя то же топливо, которое Вы рекомендуете, то достиг примерно такого же улучшения. В этом случае может быть небольшая разница лишь за счет потерь на энергетическое топливо для нефтеперерабатывающих заводов. Однако основной выигрыш, значительно превосходящий все остальное, будет обусловлен увеличением к. п. д. двигателя. Так ли это?

Джонсон. Да, я рад, что затронули этот вопрос, потому что забыл его подчеркнуть. Разница в 604 м³/сут при производстве транспортных топлив из 15 900 м³ нефти составляет всего 4%, но если обратить это в эквивалентный пробег, то получится более 482 700 000 км в сутки. Если рассматривать вопрос в таком аспекте, то он звучит значительно сильнее.

Бидвелл. Второй вопрос. Производство дизельного топлива в нашем максимальном дизельном варианте значительно ниже, чем по данным Х. Шеннона. Я полагаю, что это объясняется затруднениями, с которыми вы встретились в процессе переработки. Если бы Вы вели расчеты на новый нефтеперерабатывающий завод, то выигрыш в дизельном варианте был бы большим. Правильно ли это?

Джонсон. Мы могли бы увеличить этот выигрыш, если бы не учитывали некоторых ограничений. Мы полагали, что можно при некоторых обстоятельствах дополнительно сэкономить 1113 м³/сут нефти. Таким образом, полученная разница обусловлена различным подходом к решению проблемы. Единственное ограничение, которое нами было сделано, это то, что для перегонки на атмосферной установке был установлен предел в 40%, в то время как теоретически он может достигать, как мне кажется, 52%. Однако, насколько мне известно, никто не эксплуатирует нефтеперерабатывающий завод на таком теоретическом уровне.

Дж. В. Хейвуд (Массачусетский технологический институт). Я хотел бы дополнить вопрос господина Бидвелла относительно дизельного варианта. Не связаны ли выводы по этому варианту с количеством дизельного топлива, которое Вами было произведено? Реальны ли Ваши выводы, если рассматривать этот вопрос на длительную перспективу? О чем мы собственно ведем речь? Допустим, что мы перешли на производство дистиллята — $\frac{1}{3}$ дизельного топлива, $\frac{2}{3}$ бензина широкого фракционного состава (мы имеем в виду 10—20-летний период времени). В этом случае Ваше сравнение варианта с дизельным топливом и топли-

вом широкого фракционного состава, выраженное в километрах пробега транспорта, является нереальным.

Джонсон. Надо ли понимать Ваш вопрос так, что мы могли увеличивать производство дизельного топлива до размеров, эквивалентных возможностям производства топлива широкого фракционного состава, выкипающего в пределах 38—344°C? В этом ли заключается основное содержание Вашего вопроса?

Хейвуд. Я считаю, что если исходить из долгосрочной перспективы, то возможность производства дизельного топлива может быть значительно ближе к производству топлива широкого фракционного состава, чем об этом свидетельствуют Ваши данные.

Джонсон. Я не уверен в том, что это возможно. Необходимо помнить, что фракционный состав дизельного топлива значительно отличается от фракционного состава топлива, выкипающего в пределах 38—344°C. Топливо широкого фракционного состава содержит бензиновые фракции. А при производстве дизельного топлива придется получать какое-то количество бензина, используя его для другого назначения.

Л. А. Мак Рейнолдс (фирма «Филиппс петролеум»). По вашим данным получается, что одному кубическому метру нефти соответствуют 4453 км пробега на автомобилях с двигателями с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда и 3613 км на автомобилях с газотурбинными двигателями. При этом Вы исходили из предположения, что газотурбинный двигатель может работать на топливе широкого фракционного состава. Поэтому эта разница будет обусловлена лишь к. п. д. двигателей. Считаете ли Вы, что предполагаемая разница в к. п. д. реальна?

Джонсон. Вариант, о котором Вы говорите, касается гипотетического двигателя, который может рассматриваться как двигатель будущего. В процессе работы над рассматриваемой проблемой мы опросили многих специалистов. Основные автомобильные компании заявили, что было бы очень интересно, если бы нам удалось включить в наше исследование вариант с гипотетическим двигателем такой же экономичности, как и двигатель в основном варианте, и посмотреть, каким будет при этом пробег автомобилей, приходящийся на кубический метр нефти.

В. Е. Мак Дональд (фирма «Марафон ойл»). Учитывали ли Вы использование каталитических дожигателей и возможность более точной регулировки двигателя при сравнении этилированных и неэтилированных бензинов для достижения более высокой экономии?

Джонсон. Нет. Мы не принимали во внимание регулировку двигателя, которую Вы имеете в виду, и использование каталитических дожигателей. Мы говорим только о двигателе как таковом, который должен удовлетворять требованиям стандарта по ограничению загрязнения окружающей среды отработавшими

газами, а именно выбросы не более: 0,95 НС, 9,32 СО и 1,93 NO_x г/км

Дж. П. Лонгвелл (фирма «МИТ энд эксон компани»). По моему суждению, говоря о транспортных топливах, Вы не учитываете авиационных топлив. Дело не только в том, что это вопрос расчета. Я хочу подчеркнуть, что в большинстве прогнозов, с которыми мне приходилось знакомиться, потребности в авиационных топливах растут быстрее, чем потребности в наземных топливах, что важно с точки зрения потребления среднестиллятных фракций. Для производства авиационных топлив требуется большое количество парафиновых дистиллятов. Если мы будем получать значительно больше дизельного топлива или топлив для двигателей с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда, то возникнут большие трудности в получении таких авиационных топлив. Возникнет необходимость породородов путем гидрогенизации, что приведет к снижению эффективности нефтеперерабатывающих заводов, в результате чего мы снова окажемся на том же месте, на котором находимся в настоящее время.

Джонсон Потребности в реактивных топливах учитывались. Это являлось одним из ограничивающих факторов. Если потребность в авиационных топливах будет изменяться неравномерно или не укладываться в пропорции, принятые в нашем исследовании, придется произвести перерасчеты и посмотреть, сколько может быть произведено каждого топлива. К сожалению, я не внес ясность в этот вопрос, но что касается транспортных топлив, то под ними мы понимаем топливо только для наземного транспорта.

Р. В. Барджет («Дженерал моторс корпорейшн»). Мой вопрос касается топливной экономичности. Согласно Вашим данным, при работе на двигателях с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда относительная экономия топлива составляет 1,3. Поскольку я представляю компанию, производящую свечи зажигания, хотелось бы сказать, что нас очень интересует вопрос о том, какие свечи зажигания будут требоваться для этих двигателей. Мы увеличили вдвое размеры свечей зажигания в обычном двигателе и получили такую же экономию. Хотелось бы знать, за счет чего достигается экономия топлива в двигателях с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда — за счет послойного распределения топлива или за счет использования двухдьюмовых свечей в течение длительного времени?

Джонсон. Если я правильно Вас понял, то Вы путем модификации свечей зажигания и использования их в стандартных автомобильных двигателях добились такого же увеличения экономии топлива?

Барджет. Нет. Нами просто был взят дорожный двигатель и установлен в лаборатории на стенде. Мы поместили электроды

свечи в геометрическом центре камеры сгорания и путем повторяющегося зажигания добивались такого же повышения экономичности двигателя, работающего по обычному циклу, как и в случае работы на двигателе с непосредственным впрыском и послойным распределением топливного заряда.

Джонсон. Хорошо. Хотелось бы только уточнить, может ли этот двигатель работать на топливе широкого фракционного состава?

Дж. Л. Бекхем (Отдел Кадиллак мотор фирмы «Дженерал моторс корпорейшн»). Хотелось бы снова вернуться к вопросу о коэффициенте 0,93 для бензина с октановым числом 91, который, как Вы указали, был получен для автомобиля без каталитического дожигателя. Мне кажется, что это исследование было проведено в 1974 г.

Хотелось бы знать Ваше мнение по вопросу о том, каким был бы этот коэффициент в настоящее время, когда имеются большие возможности экономии топлива на автомобилях с каталитическими дожигателями.

Джонсон. В 1974 г., когда мы начинали исследование этого вопроса, нам казалось, что определение относительной топливной экономии имеет важное значение. Мы хотели, чтобы начали думать о возможности достижения максимального пробега транспортных средств, приходящегося на кубический метр нефти. Мне кажется, что все желающие добиться этого должны рассмотреть вопрос об относительной экономии топлива со своей точки зрения, разработать программу и посмотреть, что из этого получится. Я действительно считаю, что в арифметике может быть некоторая разница, даже уверен в этом. Но я думаю, рассматривая проблему в относительном плане, переход к топливу широкого фракционного состава даст возможность добиться увеличения пробега транспортных средств из расчета на кубический метр нефти.

Дж. М. Колуччи (фирма «Дженерал моторс лэборэтриз»). Имеются ли у Вас какие-либо планы повторить ваши исследования в части, касающейся удовлетворения нормам по предотвращению загрязнения окружающей среды в связи с ужесточением этих норм по сравнению с теми, которые были приняты за основу в Вашей работе?

Джонсон. Когда мы начинали эту работу, то было много ограничивающих факторов и одним из таких факторов были стандартные нормы на содержание в отработавших газах токсичных компонентов, загрязняющих окружающую среду. Возможно, мы должны были рассматривать этот фактор с позиций более жестких норм и тогда получили бы несколько иные результаты, касающиеся относительной топливной экономичности. Но при определенной степени такого ужесточения придется вообще исключить некоторые альтернативные пути решения проблемы. У нас нет планов продолжения работы в этом направлении, но мы хотели бы изучить возможности новых нефтеперерабатывающих заводов вместо того, чтобы делать допущения для их моделей. От-

вечая на Ваш вопрос, я должен сказать, что у нас нет никаких планов относительно проведения подобных исследований с учетом более жестких норм по предотвращению загрязнения окружающей среды

ВЫБОР АВТОМОБИЛЬНЫХ ТОПЛИВ И ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В БУДУЩЕМ

Р. Ф. СТЕБАР, В. А. ДАНИЭЛЬ, А. Р. САРПЕ, Б. Д. ПЕТЕРС
Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»,
Уоррен, штат Мичиган, США

В будущем при производстве топлив для автомобилей, на которых будут установлены современные или другие возможные двигатели, работающие на топливах, получаемых из различных источников (горючих сланцев, угля, ядерной энергии, биомассы), придется позаботиться о снижении расхода энергии на переработку первичных источников энергии. На энергетические проблемы оказывают влияние многие факторы, включающие загрязнение окружающей среды, экономику и политику, имеющие большое, а порой определяющее значение в принятии окончательного решения относительно подбора топлива и двигателя.

В настоящей работе рассматриваются вопросы, касающиеся только эффективности использования энергии в автомобилях. Эта эффективность, в свою очередь, зависит от эффективности: 1) производства различных видов сырья, 2) производства топлива из сырья, 3) системы распределения топлива (от производителя к потребителю), 4) применения топлива на автомобиле.

Авторами исследовались вопросы, касающиеся второго и четвертого пунктов, потому что они определяют общую оценку использования энергии.

Эффективность производства автомобильного топлива (главным образом, различные жидкие углеводороды и спирты) из первичных источников энергии оценивались на основании критического анализа литературных данных. Возможность использования каждого из этих топлив на современных или возможных двигателях будущего устанавливалась исходя из его характеристики сгорания (октановое или цетановое число), испаряемости и наличия загрязнений (сера, азот и зола). В качестве силовых установок рассматривались обычные двигатели внутреннего сгорания с искровым зажиганием, дизельные, двигатели с послойным распределением топливного заряда, паровые, газотурбинные и Стирлинга.

При оценке эффективности применения топлив на этих двигателях за основу принимались двигатели сравнимых размеров, выделяющие примерно одинаковое количество загрязнений и имеющие сходную характеристику. Для большинства возможных двигателей будущего эти данные отсутствуют. Поэтому оптимальное использование энергии иллюстрируется данными, полученными на двигателях с искровым зажиганием и дизельных двигателях. Исходя из этих положений наиболее эффективными являются топлива, получаемые из нефти, за ними следуют топлива, получаемые из горючих сланцев, угля, биомассы и ядерной энергии.

С целью установления комбинаций возможных топлив и двигателя с наибольшим энергетическим к п д требуется внести некоторые изменения в исходные данные. Эффективность превращения источников энергии в топлива должна быть установлена с большей определенностью, чем это возможно было ранее, должны быть определены свойства получаемых топлив и измерена эффективность их использования на автомобилях. Подобные изменения должны

производиться с топливами и двигателями в автомобилях, сравнимых по размерам, характеристике и количеству выбрасываемых в атмосферу загрязнителей.

Кроме того, в будущем будет оправдано проведение исследований топлив и двигателей, которые в настоящее время кажутся несовместимыми, но содержат в себе потенциальную возможность более эффективного использования энергии.

Введение Стремление добиться энергетической самообеспеченности может в некоторых случаях в будущем заставить использовать в качестве автомобильного топлива ненефтяного происхождения. При создании запасов энергии возникнут следующие проблемы. Какое топливо можно будет производить эффективно? Из каких источников? Какие двигатели должны использоваться?

Для ответа на подобные вопросы потребуются оценка энергетического к п д всей системы производства и использования, начиная с сырья, находящегося в недрах, и до превращения энергии в механическую работу. В таком исследовании должны быть учтены все потенциальные топлива, основные источники таких топлив и реальные испытания потенциальных топлив в оправдавших себя автомобильных двигателях. С целью достижения наибольшего к п д в использовании энергетических ресурсов на автомобилях необходимо подобрать такое топливо и двигатель, которые могли бы обеспечить наиболее высокую эффективность в условиях производства и эксплуатации топлив.

Безусловно, энергетический к п д не является единственным критерием, определяющим наиболее удачную комбинацию топлива и двигателя. При их выборе приходится считаться с предотвращением загрязнения окружающей среды, политическими факторами и экономическими соображениями. Оценка экологических и экономических факторов связана с большими трудностями, а предсказание политических факторов вообще невозможно. Тем не менее при окончательном решении вопроса о выборе топлива и двигателя эти факторы могут оказаться доминирующими.

В настоящей работе внимание было сосредоточено на оценке комбинаций топлива и двигателя без учета экологических, политических и экономических соображений.

Методология оценки энергетического к п д. При решении вопроса использования автомобильных топлив, получаемых из различных естественных источников, приходится считаться со следующими техническими этапами:

- 1 Получение сырья (разработка горных месторождений, бурение, сбор урожая и др.).
- 2 Превращение сырья в топливо
- 3 Распределение топлива для его доставки потребителю
- 4 Использование топлива в легковом автомобиле

Некоторые из этих этапов отличаются большим энергетическим к п д, чем другие, и общий энергетический к п д, который представляет собой произведение к п д составляющих этапов, может изменяться в зависимости от источника топлива, конкретно

Таблица 1. Источники энергии

Ископаемые	Неископаемые
Нефть	Биомасса
Природный газ	Ядерная энергия
Уголь	Геотермальная энергия
Горючие сланцы	Гидроэнергия
	Солнечная энергия
	Энергия прибоев
	» ветра

вания химической технологии и, вообще говоря, отличаются более высоким к. п. д., чем остальные этапы [1, 2]. «Общий энергетический к. п. д.» был получен как произведение:

$$\text{Общий энергетический к. п. д.} = \text{К. п. д. производства топлива} \times \text{К. п. д. применения топлива}$$

Очевидно, термин «Общий энергетический к. п. д.» не является таким емким, как термин «Общий к. п. д.». Тем не менее он дает возможность оценить будущую комбинацию топлива и двигателя.

Ниже приводится описание принятого в работе метода оценки систем: топливо — двигатель. Внимание авторов было направлено на исследование следующих вопросов:

1. Энергетические ресурсы и потенциальные топлива.
2. Эффективность производства топлива из различных источников энергии.
3. Свойства топлива и совместимость топлива и двигателя.
4. Эффективность, с которой различные топлива могут применяться на автомобилях (эффективность применения топлив на двигателях различного типа).
5. Общий энергетический к. п. д. (основа для оценки энергетической эффективности будущих комбинаций топливо—двигатель).

Энергетические ресурсы и потенциальные топлива. В табл. 1 представлены первичные источники энергии, которые считаются достаточными для обеспечения производства будущего автомобильного топлива. Из них наиболее вероятными источниками энергии считают нефть, горючие сланцы, уголь, биомассу и ядерную энергию [3, 4]. Природный газ из-за недостаточности его ресурсов в этот список не включен. Геотермальная энергия, гидроэнергия, солнечная энергия, энергии прибоев и ветра будут использоваться главным образом в виде электричества и поэтому в анализе рассматриваются так же, как и ядерная энергия.

Из первичных источников энергии с помощью соответствующих процессов могут быть получены разнообразные топлива. Некоторые виды топлив, которые могут быть получены из нефти, горючих сланцев и угля, представлены на рис. 1. Наиболее вероятные автомобильные топлива, полученные из первичных ис-

полученного топлива и типа использованного автомобильного двигателя.

С целью упрощения оценки потенциальных возможностей из цепи от получения сырья до конечного применения топлива были исключены этапы получения сырья и распределения топлива. Они включают в себя главным образом механические процес-

сы, а не процессы совершенство-

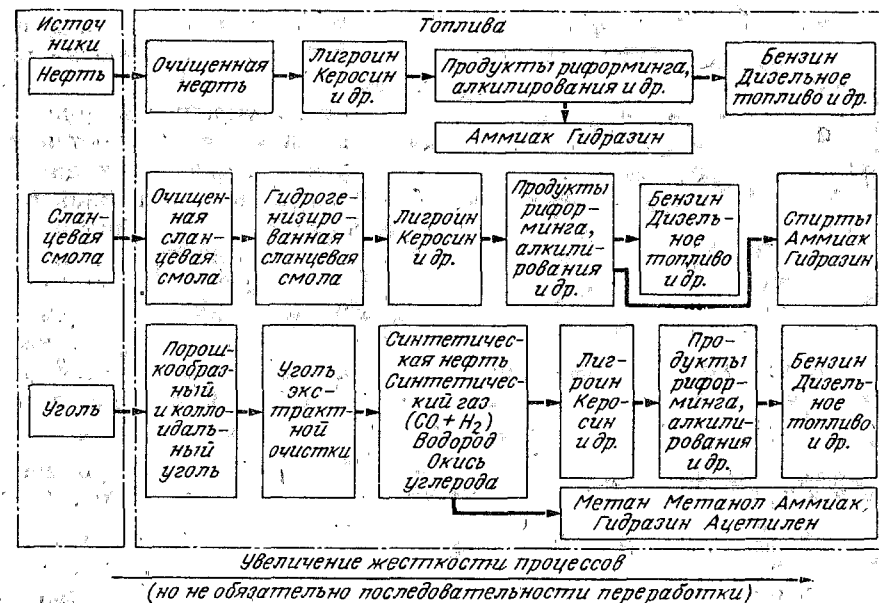


Рис. 1. Топлива, которые можно получать из ископаемых источников энергии

точников энергии, приведены в табл. 2 [3, 4]. При этом все газообразные топлива, такие, как водород, легкие углеводороды и аммиак, были исключены вследствие их низкой объемной теплотворной способности и трудностей содержания в автомобильных топливных баках [3, 4]. Исключено также азотоводородное топливо в связи с дополнительными проблемами, обусловленными его токсичностью [3, 4].

Как видно из рис. 1 и табл. 2, дизельное топливо может быть получено из различных источников энергии. Однако его получение из горючих сланцев и угля связано с большим количеством различных процессов переработки, чем при производстве из нефти, и поэтому требуется больший расход энергии на их получение. Отсюда следует, что эффективность производства топлива при оценке эффективности системы «топливо—двигатель» является решающей.

К. п. д. производства топлива. Определение к. п. д. производства топлива. Количество энергии, расходуемой для производства топлива, зависит от его характеристики и источника получения. К. п. д. производства топлива отражает количество энергии, затраченной на его получение.

В настоящем докладе к. п. д. производства топлива определяется формулой

$$e = \frac{H_p}{H} 100,$$

Таблица 2. Вероятные автомобильные топлива из различных первичных источников энергии

Источник энергии	Топливо
Нефть	Очищенная нефть ¹ , дистиллятное топливо ² , бензин и дизельное топливо
Сланцевая смола	Гидрогенизированная сланцевая смола, дистиллятное топливо, бензин и дизельное топливо
Уголь	Порошкообразный уголь, порошкообразный уголь после экстрактивной очистки, бензин, дизельное топливо, метанол, жидкие углеводороды, получаемые в результате процесса Фишера — Тропша
Биомасса	Этанол, жидкие углеводороды
Источники ядерной энергии	Метанол, жидкие углеводороды Фишера — Тропша
Все источники	Электроэнергия

¹ Удалены вода, твердые примеси и газы

² В настоящем докладе под дистиллятным подразумевается топливо, получаемое перегонкой, но без специального увеличения октановых или цетановых чисел

где e — к. п. д., %;

H_p — высшая теплота сгорания полезной части топлива¹;

H — высшая теплота сгорания материала, представляющего первичный источник энергии, использованный для получения топлива, плюс энергия, израсходованная в процессе его производства и эксплуатации вспомогательных установок для получения водорода, кислорода, электроэнергии и т. п.

В этом определении предполагается, что средства производства топлива обеспечены из того же первичного источника энергии, являющегося сырьем для получения топлива. Топливо, которое может быть получено при минимальном расходе энергии, обладает высоким энергетическим к. п. д., и его использование повышает энергетический к. п. д. системы «топливо—двигатель».

Условия определения. Оценка к. п. д. производства топлива была бы значительно проще в тех случаях, когда хорошо отработана технология его получения и когда имеется следующая информация относительно его производства:

1. Количество исходного материала, требующегося для производства топлива.
2. Количество получаемого полезного топлива.
3. Количество исходного материала, требующегося для обеспечения работы технологических и вспомогательных установок.

Однако в США нет ни одной крупной установки для производства автомобильного топлива из ненефтяных источников. Даже

¹ Так, сероводород и аммиак не рассматриваются в качестве «полезных» топливных продуктов, несмотря на то, что они обладают теплотой сгорания

нефтеперерабатывающие заводы, на которых вырабатывается автомобильное топливо, не автономны. Нефть на этих заводах не является единственным источником энергетического сырья. Поэтому даже в случае отработанной технологии имеющаяся информация не может быть использована для расчета к. п. д. производства топлив, получаемых из нефти.

Еще более сложная ситуация складывается в случаях, когда приходится иметь дело с вновь разработанной технологией производства топлива. Обычно доступная информация относится к экспериментам, приводимым в лабораторном масштабе или в лучшем случае на полужавовских установках. Данные, касающиеся количества использованного первичного материала и количества полученного топлива, имеются только для полупродуктов, как, например, для гидрогенизата сланцевой смолы или для синтетических жидких горючих, полученных из угля. В этих данных не содержится информация относительно энергии, потребной для обеспечения технологического процесса и функционирования вспомогательных установок. Кроме того, эти данные не основаны на автономности установок и относятся только к частным условиям технологических процессов, которые не были оптимизированы. Чаще всего в стадии разработки находится несколько альтернативных процессов производства данного топлива из того или иного сырья. Поэтому к. п. д. производства топлива, приводимый в настоящей статье, определен как на основании имеющейся информации, так и на основании инженерных суждений. Последние необходимы при оценке влияния на к. п. д. производства топлива исходного сырья, технологии производства и качества получаемого топлива. Среди факторов, касающихся исходного сырья, большое значение имеет содержание примесей (S, N, O и H₂O). Высокое содержание водорода и малое содержание загрязнений благоприятствует увеличению к. п. д. производства топлива. Среди факторов, касающихся технологического процесса, наиболее важным является его стабильность. Увеличение стабильности технологического процесса ведет к снижению эффективности производства, хотя и позволяет увеличить выход готовой продукции. Нормирование различных загрязнений ведет к снижению эффективности производства.

При определении к. п. д. производства различных топлив из потенциальных ресурсов предполагалось, что только из данного сырья производится лишь одно топливо, хотя в действительности по данной технологии может быть получено и больше топлив. При этом к. п. д. производства топлива изменится.

Результаты. На рис. 2 представлен наиболее вероятный к. п. д. производства потенциальных автомобильных топлив, которые могут быть получены из нефти, горючих сланцев, угля, биомассы и ядерной энергии. На этом рисунке рядом с обозначениями в виде черных прямоугольников количественно, в процентах, оценивается к. п. д. производства топлива. Протяженность черных прямоугольников характеризует степень неопределенности получен-

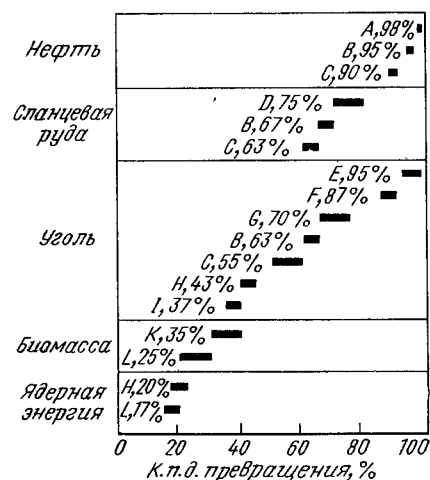


Рис 2. К п д превращения топлива

A — очищенная нефть, B — дистиллят, C — бензин/дизельное топливо, D — гидрогенизированная сланцевая смола, E — порошкообразный уголь, F — уголь экстракционной очистки, G — синтетическая нефть; H — метанол, I — жидкие углеводороды процесса Фишера-Тропша, K — этиловый спирт, L — жидкие углеводороды

тяные дистилляты без их характеристики по октановому или цетановому числам, получаемые путем прямой перегонки К. п. д. производства топлив такого типа из нефти оценивается в 95% [5, 6]. Для дизельного топлива и бензина к. п. д. производства принят равным 90% [5, 6, 7]. Мы понимаем, что к. п. д. производства дизельного топлива и бензина неидентичны, однако для масштаба, в котором выполнен приведенный рисунок, это различие незначительно.

Определение точного к. п. д. производства дистиллятного топлива, дизельного топлива и бензина зависит от ряда факторов, таких, как качество перерабатываемой нефти, выход автомобильного топлива из сырья и желательных свойств топлива, определяемых нормативами [8].

Котельное топливо из горючих сланцев. Как было упомянуто выше, из горючих сланцев, так же как и из нефти, могут быть получены при первичной переработке четыре вида топлива: гидрогенизированная сланцевая смола, дистиллятное топливо, дизельное топливо и бензин. Наиболее высокий к. п. д. (около 75%) производства имеет гидрогенизированная сланцевая смола [9, 10], а к. п. д. производства дизельного топлива и бензина равны примерно 63% [9—15]. Дистиллятное топливо может быть получено из сланцевой смолы при к. п. д. примерно

67% [9—12]. Для получения из сланцевой смолы высоко очищенного топлива, подобного бензину и дизельному топливу, требуется больше энергии, чем для получения тех же продуктов из нефти, потому что сланцевая смола обычно содержит больше высокомолекулярных парафиновых углеводородов и значительно больше азота, чем нефть. Поэтому для удовлетворения жестких нормативов сланцевая смола может потребовать более глубокой и комплексной переработки.

К. п. д. производства потенциальных топлив из сланцевой смолы в зависимости от метода получения смолы из горючих сланцев, а также типа горючих сланцев может колебаться.

Топлива из угля. К. п. д. производства размеров частиц и содержания влаги и золы равен 95% [16, 17]. Измельченный уголь экстракционной очистки получается при меньшем к. п. д. процесса производства, равном 87% [18, 19]. Однако такой уголь содержит значительно меньше золы и серы, чем исходный измельченный уголь [19]. Жидкое топливо из угля может быть получено путем его гидрогенизации и газификации.

Из жидких топлив, получаемых путем гидрогенизации, наиболее высокая эффективность, по-видимому, у таких синтетических продуктов, как Synthoil. Этот вид малосернистого жидкого топлива, практически не содержащего золы, может получаться при к. п. д. производства примерно 70% [9, 20—29]. При более глубокой очистке таких синтетических продуктов с целью получения дистиллятного топлива с малым содержанием серы и азота, к. п. д. производства снизится. Наконец, при получении дизельного топлива и бензина он составит 55% [20—29].

Для производства жидкого топлива из синтетического газа, получаемого из угля, требуется по сравнению с методом гидрогенизации больше технологической энергии [30—32]. При этом могут быть получены метанол, а также парафиновые и олефиновые жидкие углеводороды (процесс Фишера—Тропша) [30—32]. Для метанола к. п. д. производства оценивается в 43% [9, 20], в то время как для жидких углеводородов — 37% [9, 20, 30—32].

Для одинаковых видов топлива из угля требуется больше энергии, чем при получении их из нефти или из горючих сланцев. Это связано с тем, что в угле содержится значительно меньше водорода, чем в нефти и сланцевой смоле [19]. Кроме того, химически уголь представляет более сложную структуру, а в его составе обычно содержится больше золы, влаги, серы и азота, чем в нефти [19, 33, 34].

Эффективность производства топлива из углей будет сильно изменяться в зависимости от их вида¹, содержания влаги и состава. Она будет также зависеть от применяемой технологии пе

¹ Угли различаются по содержанию углерода и по теплоте сгорания. По этим признакам они делятся на четыре вида: 1) антрацит, 2) битуминозные, 3) суббитуминозные и 4) лигниты.

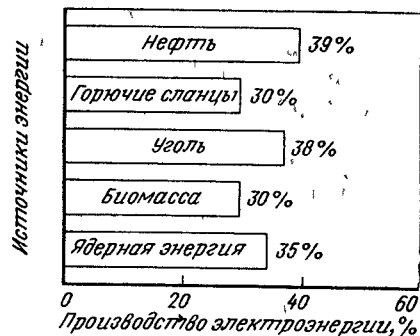


Рис. 3. К. п. д. производства электроэнергии из различных источников

ву. К. п. д. производства этанола оценивается в 35% [33, 35], а жидких углеводородов — в 25% [36—38].

Жидкое топливо, получаемое с помощью ядерной энергии. В охлаждаемых водой ядерных реакторах с помощью тепла или электроэнергии из воды может быть получен водород. Взаимодействуя с окислами углерода, получаемыми разложением известняка, водород образует метанол или жидкие углеводороды (процесс Фишера—Тропша). К. п. д. производства водорода с помощью ядерной энергии равен 25—30% [39, 40]. Согласно нашей оценке, общий к. п. д. процессов получения метанола и жидких углеводородов с помощью ядерного реактора равен соответственно 20 и 17% [39, 41]. Нами не рассматривался процесс с применением реакторов-размножителей или термоядерных реакторов из-за неясности их перспектив.

Электроэнергия, получаемая из первичных источников энергии. Одним из путей использования первичных источников энергии является получение электроэнергии, которая может быть использована в автомобилях, работающих на электрических аккумуляторах. Для того чтобы из таких источников энергии, как нефть, горючие сланцы, уголь и биомасса, получать электроэнергию, они должны подвергнуться предварительной обработке. Поэтому к. п. д. получения электроэнергии из таких источников энергии равен произведению к. п. д. производства топлива на к. п. д. работы электростанции. В нашей работе мы исходили из к. п. д. атомной электростанции 40% [42, 43]. Согласно оценке, к. п. д. производства электроэнергии из пяти перечисленных источников автомобильного топлива представлена на рис. 3.

В качестве энергетического топлива для электростанций с успехом могут быть использованы очищенная нефть, гидрогенизированная сланцевая смола и измельченный уголь; умножая к. п. д. производства этих топлив на 40%-ный выход, получим соответственно к. п. д. производства электроэнергии: 39, 30 и 38%.

переработки угля и требуемых характеристик получаемого топлива. В большинстве случаев технология получения различного топлива из угля находится в стадии разработки. Поэтому потребуется некоторое время для того, чтобы можно было получать жидкое топливо из угля в больших количествах.

Топливо из биомассы. Из биомассы могут получаться в основном два вида топлива — спирты (главным образом этанол) и жидкие углеводороды, подобные дистиллятному топли-

Биомассу перед применением необходимо высушить, очистить и измельчить. Согласно нашей оценке, используемый вид биомассы может быть получен при 75%-ном к. п. д. производства [44]. Таким образом, к. п. д. производства электроэнергии из биомассы будет равен 30% [44, 45].

К. п. д. производства электроэнергии и к. п. д. электростанций при использовании в качестве источника энергии ядерного реактора одинаковы. Вообще говоря, к. п. д. ядерной установки ниже к. п. д. современной паровой установки на ископаемых горючих. Исходя из этого, мы считаем, что электроэнергия с помощью ядерного реактора с водяным охлаждением получается при к. п. д. 35% [42, 43].

Свойства топлив и совместимость топлива и двигателя. Несмотря на то что эффективность производства топлива является важным фактором, она — лишь один из многих критериев, определяющих выбор потенциального топлива будущего. Решающее значение имеют также физические и химические свойства топлива, поскольку они определяют совместимость его с двигателем. Будущие двигатели станут, очевидно, создаваться на основе усовершенствования и развития современных двигателей, к которым относятся дизельные двигатели, различные двигатели с искровым зажиганием и послойным распределением заряда топлива, газотурбинные двигатели, паровые двигатели, двигатели Стирлинга и электродвигатели с аккумуляторами. Некоторые представления о требованиях этих двигателей можно получить на основании опыта применения нефтяного топлива.

К характеристикам топлива, от которых зависит удовлетворительная работа двигателя, относятся: сгорание, испаряемость, содержание загрязнений, вязкость, объемная энергоемкость, плотность и безопасность при обращении с ними. Характеристики сгорания особое значение имеют для двигателей с прерывистым воспламенением, поскольку от них зависит детонационная стойкость топлива (октановая характеристика) или способность его быстро воспламеняться после сжатия (цетановая характеристика). Испаряемость топлива должна соответствовать применяемой системе сгорания. Наличие загрязнений, подобных сере, азоту и золе, нежелательно. При высоком содержании серы и азота могут образоваться двуокись серы, сульфаты и окислы азота, в связи с чем возникнут проблемы предотвращения загрязнения окружающей среды. Кроме того, высокое содержание серы и золы оказывает отрицательное влияние на ресурс двигателя. Удаление этих загрязнений обычно связано с дополнительными расходами энергии, и, возможно, что качество будущего топлива придется доводить до качества современного нефтяного топлива.

Вязкость и объемная энергоемкость, а также плотность топлива для удовлетворительной работы двигателей, может быть будут иметь меньшее значение, однако они могут влиять на характер оборудования для хранения, перекачки и измерения количества топлива.

Значительно больше трудностей представляет определение свойств потенциальных топлив для будущих двигателей. Большинство таких топлив мы не располагаем в достаточных количествах для проведения лабораторных исследований и моторных испытаний. Поэтому невозможно точно оценить их физические и химические свойства. Тем не менее, по литературным данным [3, 4, 19, 23, 32, 46—51], данным анализа природы первичных источников энергии [15, 19, 25, 34, 52], а также характеристик процессов получения топлив [3, 9, 12, 15, 19, 30, 53] можно составить четкое представление о свойствах будущих топлив.

В табл. 3 приводится прогноз свойств возможных топлив, представленных на рис. 2. В этой таблице «высокая» и «низкая»

Таблица 3 Свойства потенциальных автомобильных топлив

Источник получения топлив	Высокая ¹ октановая характеристика	Высокая цетановая характеристика	Высокая испаряемость	Присутствие серы	Низкое ¹ содержание азота	Зола	Низкая вязкость	Высокая объемная теплотворная способность
Нефть и дистилляторы								
нефть	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Да	Нет	Да
дистиллят	»	»	»	»	»	»	Да	»
Уголь								
порошкообразный	?	?	»	Да	Нет	Нет	Твердое вещество	Нет
порошкообразный экстракционной очистки	?	?	»	»	»	»	То же	»
синтетическая нефть	Нет	Нет	»	»	»	»	Нет	Да
дистиллят	Да	»	»	»	Да	Да	Да	»
дизельное топливо	Нет	Да	»	Нет	Да	»	»	»
бензин	Да	Нет	Да	»	»	»	»	»
метанол	»	»	»	»	»	»	»	Нет
жидкие углеводороды Фишера—Тропша	Нет	Да	»	»	»	»	»	Да
Горючие сланцы								
гидрогенизированная смола	»	Нет	Нет	»	Нет	»	Нет	»
дистиллят	»	Да	»	»	Да	»	Да	»
дизельное топливо	»	»	»	»	»	»	»	»
бензин	Да	Нет	Да	»	»	»	»	»
Биомасса								
этанол	Да	»	»	»	»	»	»	Нет
жидкие углеводороды	Нет	Да	»	»	»	»	»	Да
Ядерные реакторы								
метанол	Да	Нет	»	»	»	»	»	Нет
жидкие углеводороды	Нет	Да	»	»	»	»	»	Да

¹ Термины «высокая» и «низкая» являются относительными терминами, используемыми на практике для характеристики бензина и дизельного топлива, получаемых из нефти.

Таблица 4 Совместимость топлива и двигателя

Двигатель	Топливо				Двигатель	Топливо			
	Дистиллятное	Дизельное	Бензин	Электроэнергия		Дистиллятное	Дизельное	Бензин	Электроэнергия
Дизель		X			Газотурбинный	X	X	X	
Обычный с искровым зажиганием			X		Паровой	X	X	X	
С искровым зажиганием и послынным распределением топливного заряда	X	X	X		Стирлинга	X	X	X	
					Электрический (аккумуляторный)				X

представляют собой относительные термины в современном смысле, используемые для сравнения свойств с нефтяными топливами. Обозначения «Да» или «Нет» представляют собой упрощение при относительном сравнении свойств топлив. Можно надеяться, что в будущем мы будем располагать большим количеством топлива для проведения лабораторных исследований с целью получения более точной характеристики.

Некоторые пояснения необходимо дать относительно терминов «октановая характеристика» и «цетановая характеристика». Если дистиллят, полученный из угля, содержит большое количество ароматических углеводородов [19, 23, 34], то можно полагать, что он будет иметь высокую октановую характеристику и низкое цетановое число. Аналогично этому, если дистиллят, полученный из сланцевой смолы, будет содержать большое количество парафиновых углеводородов [12, 47, 49, 50], то, вероятно, он будет иметь высокое цетановое число и низкую октановую характеристику. Таким образом, эти термины лишь приблизительно отражают октановые и цетановые характеристики топлива. Действительные октановые и цетановые характеристики можно определить по их углеводородному составу.

Следует также пояснить и обозначения, касающиеся загрязнений. Менее очищенное топливо, полученное из угля и смолы горючих сланцев, будет содержать по всей вероятности большое количество азота и серы [12, 19, 49, 50, 53, 54]. Топлива, полученные из угля, такие, как уголь экстракционной очистки и синтетические дистилляты, могут содержать значительное количество золы [18, 19, 53].

Для надлежащей оценки будущей комбинации «топливо—двигатель», очевидно, необходимо взаимно согласовать свойства топлива и двигателя. В табл. 4 приводятся наши соображения относительно совместимости топлив, полученных из нефти, с различными возможными двигателями будущего. Индекс «X», стоящий рядом с данным типом двигателя, обозначает возможную совместимость его с вышестоящим топливом. Следует, конечно

иметь в виду, что совместимость не обязательно означает безусловное да или нет. Зачастую при решении этого вопроса приходится считаться с проблемами предотвращения загрязнения окружающей среды, с ресурсом двигателя, с его надежностью и с оценкой потребителя. Для более точного определения этих параметров требуется получение дополнительной информации.

Как видно из табл. 4, для дизеля необходимо топливо с определенным цетановым числом, а аналогично этому для обычного двигателя с искровым зажиганием — бензин с определенными октановым числом и испаряемостью.

Некоторые двигатели с послойным распределением заряда топлива могут работать на топливе с довольно широким диапазоном свойств с точки зрения октановой характеристики, испаряемости и вязкости. Газовые турбины, паровые двигатели и двигатели Стирлинга еще более расширяют диапазон характеристик, которыми придется пользоваться, потому что характер горения топлива в этих двигателях является менее важным фактором, чем для поршневых двигателей. Для производства электроэнергии на электростанциях, необходимой для зарядки автомобильных аккумуляторов, может быть использовано почти любое топливо. Несмотря на то что в этой таблице не показан этиловый спирт, который будет получаться в основном из угля или биомассы, он по всей вероятности совместим со всеми двигателями, за исключением дизельных.

В табл. 4 рассматривается совместимость двигателей только с топливами, получаемыми из нефти. Такая же оценка требуется и для топлив, получаемых из горючих сланцев, угля, биомассы и с помощью ядерной энергии. Однако мы в настоящее время не располагаем достаточными сведениями относительно требований к возможным двигателям будущего и еще меньшими сведениями относительно свойств потенциальных топлив, которые в будущем будут вырабатываться из различных источников энергии. В связи с этим полный анализ совместимости топлива и двигателей не может быть произведен до тех пор, пока мы не будем располагать достаточным для испытания количеством топлива ненефтяного происхождения. Нет необходимости говорить о том, что определение совместимости топлива и двигателя имеет важное значение для оценки эффективности использования топлива и общей энергетической эффективности комбинации «топливо—двигатель» в целом.

К. п. д. использования топлива в автомобилях. В нашем методе к. п. д. использования топлива в автомобилях определяется как энергия, требующаяся для преодоления сил инерции и динамического сопротивления движению автомобиля, деленная на расход топливной энергии автомобилем во время совершения этого движения. (Включение инерции автомобиля в этот расчет дает возможность исключить влияние массы автомобиля.)

В табл. 5 перечислены некоторые факторы, оказывающие влияние на к. п. д. использования топлива. К основным факторам от-

несены: характеристика автомобиля, содержание загрязнителей окружающей атмосферы в отработавших газах и программа движения. Некоторые двигатели с высоким к. п. д. снижают его при работе на малой нагрузке. Экологические ограничения оказывают влияние на многие двигатели, поскольку связаны с жесткими нормами. Например, требование не превышать содержание в отработавших газах NO_x 0,24 г/км может привести к

запрету эксплуатации некоторых типов двигателей, в том числе дизельных. Включение фактора программы движения объясняется тем, что в зависимости от нее может значительно измениться как расход топлива при установившемся режиме для данного сочетания двигатель—автомобиль, так и относительный расход для различных типов двигателей [55, 56, 57]. Поэтому к. п. д. использования топлива следует определять не для идеальных установившихся режимов, а с учетом характера эксплуатации двигателя в определенных условиях движения.

Ресурс, надежность, стоимость и удовлетворение потребностей потребителя отнесены ко вторичным факторам, которые также могут оказать влияние на к. п. д. использования топлива. Эти три фактора совместно с первичными факторами, надлежит, дадут возможность сравнить различные комбинации топлива и двигателя.

В табл. 6 приводится к. п. д. использования топлива для двух знакомых двигателей: двигателя с искровым зажиганием и дизеля. Детали расчета полного к. п. д. использования топлива приводятся в приложении.

Оба двигателя работали на соответствующем топливе, полученном из нефти, и оба в достаточной степени отвечали основным ограничительным требованиям. Как видно из табл. 6, время разгона у обоих автомобилей до скорости 96,6 км/ч было одинаковым, а содержание загрязнителей в отработавших газах не было одинаковым. Но различие было небольшим. Оба двигателя прошли испытания по программе Управления по охране окружающей среды. Для этих двигателей, обладающих примерно одинаковыми характеристиками, к. п. д. использования топлива соответственно было равно 17% для дизеля и 15% для бензинового двигателя. Это означает, что дизель по к. п. д. использования топлива превосходит бензиновый двигатель с обычным искровым зажиганием на 13%. (Приведенные выше значения к. п. д. использования топлива были определены на основании расхода энергии на километр пути (в ккал/км) с учетом разницы в теплотворной способности.)

Таблица 5. Факторы, влияющие на эффективность использования топлива

Первичные ограничения	Вторичные ограничения
Характеристика двигателя	Долговечность
Нормы на содержание загрязнителей в отработавших газах	Безотказность
График движения автомобилей	Стоимость. Оценка покупателя

Таблица 6. Характеристика использовавшихся автомобилей¹

Показатель	Обычный двигатель с искровым зажиганием	Дизель
Разгон 0—96,6 км/ч, с	18,7	19,4
Загрязнения, содержащиеся в отработавших газах, г/км		
HC	0,25	0,43
CO	2,4	1,4
NO _x	1,2	1,4
К п. д. использования топлива, % (городской цикл движения в соответствии с нормами управления по охране окружающей среды)	15	17

¹ Значения для данной таблицы были получены путем усреднения характеристик двух автомобилей.

Естественно, что эффективность использования топлива должна определяться для всех комбинаций топлива и двигателей, в том числе и возможных двигателей будущего. К сожалению, в настоящее время это невозможно из-за того, что, как было сказано выше, пока нет возможных топлив для исследований и двигателей, которые удовлетворяли бы всем ограничительным требованиям табл. 5. Но такую информацию в конце концов придется получить для того, чтобы можно было объективно оценить будущие топлива и двигатели.

Общий энергетический к. п. д. Как было определено ранее, общий энергетический к. п. д. представляет собой произведение к. п. д. производства топлива на к. п. д. использования топлива. Он позволяет полноценно сравнивать потенциальные комбинации топлива и двигателя с точки зрения экономии энергии. Комбинации «топливо—двигатель», обладающие высоким общим энергетическим к. п. д., являются наиболее значимыми вариантами для использования в будущем на автомобильном транспорте при условии, что они приемлемы в экологическом, политическом и экономическом аспектах.

На рис. 4 приводятся значения общего энергетического к. п. д. для обычных двигателей с искровым зажиганием и дизелей при работе на топливе, полученном из нефти. Если мы возьмем к. п. д. производства топлива 90% (из рис. 2) для дизельного топлива и к. п. д. использования топлива 17% для дизеля (из табл. 6), то получим общий к. п. д., равный 15%. Аналогичным образом для двигателя с искровым зажиганием, работающего на бензине, общий энергетический к. п. д. будет равен 13%. Поскольку в обоих случаях к. п. д. производства топлива составлял 90%, то дизель при сравнении общего энергетического к. п. д. сохраняет свои преимущества перед бензиновым двигателем.

Если допустить, что термодинамический к. п. д. дизеля и двигателя с искровым зажиганием, работающих на обычном топливе, получаемом из нефти, при работе на топливе, полученном из

Тип двигателя (к. п. д. использования топлива)	К. п. д. превращения топлива			
	Дистиллятное топливо 95%	Дизельное топливо 90%	Бензин 90%	Электроэнергия 39%
1 Дизель (17%)		15		
3 Двигатель с искровым зажиганием (15%)			13	

Рис. 4 Общий энергетический к. п. д. для топлив, полученных из нефти

других источников энергии, одинаковы, то общий энергетический к. п. д. для возможных топлив будущего снизится, как это показано в табл. 7. Общий энергетический к. п. д. в этом случае для топлива, получаемого из горючих сланцев, был бы ниже, чем у топлива, получаемого из нефти и даже ниже, чем у топлива, получаемого из угля. Эта тенденция является непосредственным результатом изменения эффективности производства топлива и

Таблица 7 Общий энергетический к. п. д.

Тип двигателя (к п д использова- ния топлива)	Нефтяные топлива			Горючие сланцы		Уголь				Био- масса	Ядер- ная энергия	Все топли							
	Нефть, 98 %	Дистиллят, 95 %	Дизельное топливо, 90 %	Бензин, 90 %	Гидрогенизированная смола, 75 %	Дистиллят, 67 %	Дизельное топливо, 63 %	Бензин, 63 %	Порошкообразный, 95 % Экстракционной очистки, 87 %	Синтетическая нефть, 70 %	Дистиллят, 63 %	Дизельное топливо, 55 %	Бензин, 55 %	Спирт, 43 %	Спирт, 35 %	Жидкие углеводороды, 25 %	Спирт, 20 %	Жидкие углеводороды, 17 %	Электроэнергия, 30—39 %
Дизельный двига- тель, 17 %			15				11					9							
Обычный двигатель с искровым зажига- нием, 15 %				13			10					8							
Двигатель с послой- ным распределе- нием топливного заряда, ?																			
Газотурбинный дви- гатель, ?																			
Паровой двига- тель, ?																			
Двигатель Стирлин- га, ?																			
Электрический ак- кумуляторный двигатель, ?																			

различных энергетических источников. Однако, поскольку эффективность производства бензина и дизельного топлива, получаемых из одного и того же источника, примерно одинаковы, то и относительное расположение соответствующих типов двигателей остается таким же для всех энергетических источников.

Наличие большого количества пустых клеток в табл. 7 свидетельствует о том, что в этом направлении предстоит еще громадная работа. Необходимо знать значения общего энергетического к.п.д. для всех потенциальных двигателей будущего при их работе на всех вероятных (и совместимых) топливах, получаемых из разных энергетических источников. Получение дополнительной информации, с помощью которой можно будет определить наиболее эффективное топливо и наиболее эффективный источник энергии, поможет выбрать наиболее эффективный двигатель для любого данного топлива или источника энергии, из которого будет получено такое топливо.

Выводы

В целях обеспечения энергетической автономности и экономии энергии была разработана логическая система, помогающая осуществить выбор комбинаций «топливо—двигатель», которые позволят в будущем свести к минимуму расход топлива автомобилями. В качестве основного показателя для оценки потенциальных комбинаций «топливо—двигатель» был выбран общий энергетический к.п.д., который получается путем умножения друг на друга к.п.д. производства возможного топлива из определенного источника энергии и к.п.д. использования топлива в автомобилях с возможными двигателями.

Топлива, которые можно получать из доступных источников энергии, классифицировались следующим образом. нефтяные топлива — очищенная нефть, дистиллятное топливо, бензин и дизельное топливо; топлива из горючих сланцев — гидрогенизированная сланцевая смола, дистиллятное топливо, бензин и дизельное топливо; топлива из угля — измельченный уголь, измельченный уголь экстрактивной очистки, бензин, дизельное топливо, метанол и жидкие углеводороды (парафиновые и олефиновые углеводороды процесса Фишера—Тропша); топлива из биомассы — этанол и жидкие углеводороды; топлива, получаемые с помощью ядерной энергии, — метанол и жидкие углеводороды. Каждый из названных пяти источников энергии может также использоваться для производства электроэнергии.

К.п.д. производства названных выше топлив оценивался на основании информации, полученной из литературных источников, и инженерной осведомленности авторов. Оценка к.п.д. производства топлива в зависимости от требуемой его характеристики колебалась в пределах 90—98% для топлив, получаемых из нефти, 63—75% для топлив, получаемых из горючих сланцев, 37—95% для топлив, получаемых из угля, 25—35% для топлив, получае-

мых из биомассы, и 17—20% для жидких топлив, получаемых с помощью ядерной энергии. К.п.д. производства электроэнергии в зависимости от первичного источника энергии может, вероятно, колебаться в пределах 30—39%.

Важным критерием оценки являлась совместимость будущих топлив и двигателей. Поскольку авторы не располагали для испытания большей частью возможных топлив, их свойства предсказывались на основании сведений относительно первичного источника энергии и характеристики технологического процесса, используемого для производства топлива. Была признана также необходимость сравнения различных комбинаций «топливо—двигатель» для современных автомобилей. Обязательным условием испытания является проведение его в реальных условиях на автомобилях с одинаковыми характеристиками по содержанию загрязнителей в отработавших газах.

При сравнении оценок к.п.д. использования топлива и общего энергетического к.п.д. из-за отсутствия возможных топлив и необходимых данных относительно автомобилей с возможными двигателями будущего вынуждены были ограничиться обычными топливами и двигателями — дизельным и с искровым зажиганием. Общий энергетический к.п.д. этих двигателей при работе на топливе, получаемом из нефти, составлял 15% и 13% соответственно. Для двух двигателей, работавших на бензине и дизельном топливе, получаемых из источников, отличных от нефти, таких, как горючие сланцы и уголь, было предсказано снижение эффективности производства топлива. Однако относительное положение этих двух двигателей осталось неизменным независимо от первичных источников энергии.

Энергетической и автомобильной промышленности предстоит проделать большую работу в области исследования возможности получения топлива из различных первичных источников энергии, определения их свойств и совместимости с возможными двигателями будущего. Такая информация имеет первостепенное значение для определения энергетического к.п.д. будущих комбинаций «топливо—двигатель». Наряду с общей энергетической эффективностью на окончательный выбор окажут большое влияние экологические, политические и экономические факторы.

ОБСУЖДЕНИЕ

М. А. Эллиот (фирма «Энерджи консалтентс») Подобные исследования зависят от исходных положений. Я не собираюсь критиковать Ваш подход к решению этого вопроса, но мне кажется, что в таких исследованиях должен учитываться коэффициент отбора месторождений для первичных источников энергии. И если мы будем учитывать этот коэффициент для нефти, то нам придется умножить полученные Вами значения на 0,33 или что-нибудь в этом роде, при открытой добыче угля на 0,8, а при подземной добыче угля на 0,5. В связи с этим мне кажется, что дл-

получения общего представления по данному вопросу необходимо проделать более сложные расчеты. Тем не менее Вы должны были начать исследование с ресурсов источников энергии в недрах земли и закончить конечным использованием топлива.

Стебар. Коэффициент отбора первичных источников энергии из месторождений является важным фактором. Однако в нашем исследовании, в котором ставилась цель увязать потенциальные топлива и двигатели в связи с оптимизацией энергетического к.п.д., мы не считаем необходимым учитывать коэффициент отбора с месторождений. В том случае, когда требуется оценить общий потенциал ресурсов, этот коэффициент, безусловно, должен учитываться.

Е. М. Диксон (Станфордский исследовательский институт). Мне кажется, что мой вопрос частично относится к Вам и частично к организаторам симпозиума. Ваша работа, несомненно, направлена против автомобилей с электрическим двигателем. Хотелось бы знать, нет ли предубежденности к этому вопросу? Согласно нашим подсчетам оказывается, что если начинать с угля в недрах земли, имея целью определение возможности транспортных перевозок, то, переходя от угля к электричеству и от электричества к транспортным перевозкам, мы получим к.п.д. порядка 14% или что-нибудь в этом роде, т.е. сравнимый с к.п.д., который мы можем получить при работе на нефтяном топливе. С другой стороны, переходя от угля к синтетической нефти, к процессам перегонки и использованию топлив в обычных автомобилях, мы получим показатели, близкие к тем, которые приводите Вы. Иными словами, создается впечатление, что автомобили с электрическими двигателями неперспективны.

Стебар. У нас, конечно, не было намерения создавать такого впечатления. Мы также производили анализ, аналогичный тому, который Вы предлагаете, но базировались на информации, которой мы располагаем. Согласно нашим расчетам до тех пор, пока будут доступны ресурсы ископаемых топлив, энергетические к.п.д. на топливах, получаемых из них, будут выше, чем на автомобилях с электрическими двигателями. Однако при рассмотрении вопроса об использовании биомассы и ядерной энергии ситуация меняется, и нам кажется, что шансы электромобилей повышаются. Но, по-видимому, это произойдет не скоро. Естественно, что ожидаемое совершенствование аккумуляторных батарей может стимулировать более ускоренное внедрение электромобилей.

Ф. Л. Драйер (Принстонский университет). Не могли бы Вы подробнее охарактеризовать двигатели с искровым зажиганием и дизельные, на которых Вы проводили испытания? Например, были эти дизельные двигатели с непосредственным впрыском топлива или с форкамерой?

Стебар. Нами использовались дизели с форкамерой, применяемые на легковых автомобилях. Бензиновые двигатели также

были обычными, но с дожигателями и другим оборудованием для ограничения загрязнения окружающей атмосферы отработавшими газами.

С. С. Пеннер. Можете ли Вы экспромтом назвать энергетические к.п.д. для двигателей Брайтона и Стирлинга?

Стебар. Общая топливная экономичность современных двигателей, работающих по газотурбинному циклу, значительно ниже, чем двигателей с искровым зажиганием или дизелей. Мы были удивлены, когда узнали о некоторых сообщениях, в которых говорилось о высокой экономичности газотурбинных двигателей. Не следует забывать, что в нашем исследовании был принят ряд ограничений: одинаковая характеристика, одинаковый уровень загрязнения окружающей среды, типичные условия движения и т.п. Мы также ограничили наши оценки, которые относились только к автомобилям, приводимым в движение обычным способом. Мы не рассматривали гипотетические варианты, которые могут возникнуть из теоретических и аналитических соображений.

Двигатель Стирлинга, насколько известно, является очень эффективным. Но этот двигатель пока не эксплуатируется на реальных автомобилях.

В. Т. Ли (компания «Камминс энджин К°»). Учитывалась ли при определении к.п.д. производства топлив вся гамма вырабатываемых продуктов, которые также могли бы служить источником энергии?

Стебар. Да, мы принимали во внимание количество и теплоту сгорания всех полезных продуктов.

Е. Е. Экленд (Управление энергетических исследований и разработок США). Когда приходится иметь дело с таким кругом вопросов, который Вы рассматриваете, необходимо учитывать и временной фактор. Мы знаем, что двигатели внутреннего сгорания, работающие на бензине, не являются самыми лучшими. В своей работе Вы основываетесь на современных и не учитываете возможных двигателей будущего. А в перспективе стоит вопрос об их внедрении. Если Ваш метод применить к более продолжительному периоду времени, то может получиться совершенно иная картина.

Стебар. Это еще как сказать. При исследовании мы исходили из перспективных изменений в области стандартов на нормы содержания загрязнений в отработавших газах и из экономичности автомобиля. Экономичность двигателя с искровым зажиганием за период с 1974 г. значительно возросла, и можно надеяться, что и дальше будет увеличиваться. Объективно говоря, не будете же Вы внедрять новые двигатели только ради внедрения. Для этого у нового двигателя должны быть определенные важные преимущества.

Нам надо выбирать комбинацию топлива и двигателя для условий, которые будут существовать.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ К.П.Д. ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА

В данном исследовании к п д использования автомобильного топлива представляет собой теоретически потребную энергию для привода автомобиля, разделенную на реально расходуемую энергию. Таким образом, в этом показателе учитываются к п д таких компонентов транспортной системы, как двигатель, трансмиссия и т п. Теоретически потребная энергия определялась из уравнения для расчета мощности двигателя, которое интегрировалось по замкнутому контуру (циклу) движения автомобиля, а реально расходуемая энергия — на основании экспериментальных измерений на автомобилях, двигавшихся по тому же циклу. При этом испытания проводились в соответствии с требованиями Управления по охране окружающей среды в городских условиях и на шоссейных автомобильных дорогах. Этими испытаниями устанавливался к п д использования топлива, который определялся из уравнения

$$\eta = \frac{0,55E_u + 0,45E_h}{\text{Теплота сгорания топлива} (0,55FC_u D_u + 0,45FC_h D_h)}$$

где η — к п д использования автомобильного топлива,
 D_u — пробег по городскому циклу движения в соответствии с требованиями УООС* — 11,99 км,
 D_h — пробег по циклу движения по шоссейным дорогам в соответствии с требованиями УООС — 16,48 км,
 E_u — теоретически потребное количество энергии для городского цикла движения в соответствии с требованиями УООС, МДж,
 E_h — теоретически потребное количество энергии для движения по шоссейным дорогам в соответствии с требованиями УООС, МДж,
 FC_u — измеренный расход топлива для городского цикла в соответствии с требованиями УООС, л/км,
 FC_h — измеренный расход топлива для цикла движения по шоссейным дорогам в соответствии с требованиями УООС, л/км,

Теплота сгорания топлива — 32,42 МДж/л бензина, 36,29 МДж/л дизельного топлива № 2

Теоретически потребное количество энергии для городского цикла движения и цикла движения по шоссейным дорогам в соответствии с требованиями Управления по охране окружающей среды (E_u и E_h) бралось из табл. А для соответствующей инерционной массы. Эти значения энергии были вычислены по следующему силовому уравнению автомобиля

$$P_T = P_{\text{сопротивление качению}} + P_{\text{аэродинамическое сопротивление}} + P_{\text{силы инерции}}$$

где P_T — общая мощность (при отрицательных значениях показатель приравнивался к нулю), Вт,

$$P_{\text{сопротивление качению}} = 0,04086 MV, \text{ Вт};$$

* Управление по охране окружающей среды

Таблица А Потребность автомобилей в энергии при загородном и городском циклах движения Управления по охране окружающей среды

Масса автомобиля, кг	$C_D A_F$, м²	Энергия, млн Дж							
		Сопротивление качению		Аэродинамическое сопротивление		Сила инерции		Всего	
		В условиях городского движения	В условиях городского движения	В условиях городского движения	В условиях городского движения	В условиях городского движения	В условиях городского движения	В условиях городского движения	В условиях городского движения
907	0,836	1,087	1,602	0,856	3,087	2,131	2,067	4,074	6,756
1134	0,882	1,358	2,003	0,905	3,259	2,601	2,381	4,864	7,643
1361	0,929	1,629	2,403	0,950	3,431	3,071	2,701	5,650	8,535
1588	0,975	1,901	2,805	0,999	3,603	3,541	3,023	6,441	9,431
1814	1,022	2,174	3,205	1,047	3,774	4,011	3,342	7,232	10,321
2041	1,068	2,445	3,605	1,093	3,946	4,480	3,664	8,018	11,215
2268	1,115	2,717	4,005	1,141	4,118	4,950	3,984	8,808	12,107

$$P_{\text{аэродинамическое сопротивление}} = 0,01284 C_D A_F V^3, \text{ Вт},$$

$$P_{\text{силы инерции}} = 0,27755 M \cdot A_c V, \text{ Вт},$$

A_c — ускорение автомобиля, м/с²,
 $C_D A_F$ — коэффициент аэродинамического сопротивления × площадь лобового сопротивления, м²,
 M — масса автомобиля, кг,
 V — скорость автомобиля, км/ч

Значения V и A_c зависели от цикла движения. Для $C_D A_F$ предполагалось, что эти значения будут изменяться пропорционально массе автомобиля от $C_D A_F = 0,836$ м² для автомобилей массой 907 кг до $C_D A_F = 1,115$ м² для автомобилей массой 2268 кг. Эти значения типичны для современных автомобилей.

Вторая часть

ИСТОЧНИКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВИДОВ АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА

Председатель заседания М. А. ЭЛЛИОТ
Консультант по энергетике. Хьюстон, штат Техас, США

УГОЛЬ КАК ИСТОЧНИК АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА

Е. Л. КЛАРК

Управление энергетических исследований и разработок.
Вашингтон, округ Колумбия, США

Получение из угля топлива для двигателей внутреннего сгорания в промышленном масштабе впервые было осуществлено примерно 50 лет тому назад. Более 30 лет тому назад в годы второй мировой войны в Германии из угля получали около 15 900 м³/сут высокооктанового бензина. Учитывая эти факты, Управление энергетических исследований и разработок в своей программе по новым источникам энергии основное внимание уделяет производству топлива для транспортных средств из угля.

В лабораториях и на полупромышленных установках отрабатываются процессы производства жидкого топлива из угля с возможно большим выходом при минимальных затратах. Образцы получаемых продуктов поступают для оценки эффективности процессов получения из угля синтетической нефти, а из нее — топлива, удовлетворяющего техническим требованиям. Количество добываемого жидкого топлива из угля в течение ближайших лет будет незначительным по сравнению с топливом, получаемым из нефти. Однако на основании проводимых в настоящее время исследований будут разработаны процессы, которые позволят получать опытные образцы топлива в значительных количествах.

Исследуемые процессы газификации угля преследуют цель снижения стоимости получения и синтетического газа из угля. Это также будет стимулировать производство автомобильного топлива с помощью процессов переработки угля, применяемых в настоящее время в Южной Африке. Разрабатываются более эффективные катализаторы для проведения таких процессов.

Прежде чем автомобильное топливо, получаемое из угля, станет реальностью, потребуется решение многих технических и транспортных проблем и прежде всего большое увеличение добычи угля. В настоящее время исследуется влияние увеличения добычи угля на экономику страны. Темпы развития производства жидкого топлива из угля и сооружения новых установок для этого зависят от действия правительства. Качество бензина, получаемого из угля, будет несколько отличаться от качества бензина, получаемого из нефти. В бензине из угля содержится больше азотистых соединений и ароматических углеводородов. Соответственно возникнут дополнительные проблемы, связанные с охраной окружающей среды от загрязнения.

Для решения этих проблем потребуется непрерывная совместная работа Управления энергетических исследований и разработок с автомобильной промышленностью.

Введение. История производства жидкого и газообразного топлива из угля включает и производство топлива для двигателей внутреннего сгорания. Почти пятьдесят лет тому назад была сооружена первая промышленная установка по гидрогенизации угля в Германии. Этот завод продолжал работать до конца второй мировой войны, в течение которой на нем производилось более 2385 м³/сут авиационного и автомобильного бензина. Кеннет Гордон в своей статье, представленной в 1946 г. Институту инженеров-механиков в Лондоне, описал процесс производства бензина из дурхемского угля, применявшийся в Биллингхеме. Гордон также подвел итоги производства высокооктанового бензина в Германии в годы второй мировой войны, максимальное производство которого достигло 15 900 м³/сут.

Программа по ископаемым источникам энергии Управления энергетических исследований и разработок учитывала эти исторические факты. Она также учитывала важное значение транспортного топлива для США, на долю которого приходится примерно 50% потребляемой нефти. На программу оказывали влияние многие факторы, которые были учтены. Для обеспечения экономики США требуются огромные количества различных видов энергии: природный или синтетический газ для обогрева помещений, производства электроэнергии и технологических процессов промышленности; жидкое топливо для транспорта, производства электроэнергии, обогрева помещений и в качестве химического сырья; твердое топливо, как источник энергии, используемой в промышленности. В данной статье излагается часть проблем, рассмотренных в программе, имеющих непосредственное отношение к производству автомобильного бензина.

«Сжижение» угля. Основной целью исследований в области «сжижения» угля является разработка такой технологии, которая была бы экономически оправданной, удовлетворяла требованиям охраны окружающей среды от загрязнения и давала возможность получать из угля удовлетворительное жидкое топливо для электростанций, транспорта и обогрева производственных и жилых помещений. Данные табл. 1 дают представление о процессах в этой области.

Из пяти перечисленных процессов наиболее подходящими для производства первичного жидкого топлива из угля являются следующие три:

а) производство жидкого топлива экстракцией угля растворителями;

б) гидрогенизация угля;

в) получение синтетической нефти.

Так называемое первичное жидкое топливо достаточно экономично, и процессы ориентированы для его получения. «Сжижение» угля можно производить в атмосфере водорода, что позволяет увеличить атомарное отношение Н/С в получаемом продукте и удалить нежелательные гетероатомы, присутствующие в исходном угле. Стоимость и эффективность производства жидкого

Таблица 1. Заключенные контракты на проекты по «сжижению» угля

Основной проект	Стоимость проекта, млн. долл.	Контрактор	Местонахождение установок	Срок сооружения
Производство жидкого топлива из угля (Coal Oil Energy Development — COED)	21,0	FMC	Принстон, штат Нью-Джерси	Сооружение полупромышленной установки завершено в 1975 финансовом году
Производство жидкого топлива экстракцией угля растворителями (Solvent Refined Coal — SRC)	41,9	PAMCO	Такома, штат Вашингтон	Пуск полупромышленной установки состоялся в середине 1975 финансового года
Гидрогенизация угля (H-Coal)	8,0	HRI	Трентон, штат Нью-Джерси, Кеттлсбург, штат Кентукки	Опытная установка вступила в строй в 1975 финансовом году, полупромышленная установка должна была вступить в строй в середине 1976 финансового года
Коксование (Clean Coke)	6,5	U. S. Steel	Монроувиль, штат Пенсильвания	Опытная установка была завершена в 1975 финансовом году, полупромышленная установка должна была вступить в строй в 1976 г.
Синтетическая нефть (Synthoil)	6,9	Foster Wheeler	Брустон, штат Пенсильвания	Сооружение началось в июне 1975 г.

топлива из угля в большой степени зависят от количества вводимого в процесс водорода. В трех упомянутых процессах с целью повышения тепловой эффективности и снижения расходов добавление водорода сведено к минимуму. Первичное топливо, получаемое в таких условиях, может быть использовано для котельных электростанций. Дальнейшее исследование этих трех процессов направлено на выяснение потенциальных возможностей получения из угля различных топлив.

Растворение угля (SRC) в атмосфере водорода происходит при помощи регенерирующегося экстрагента. Процесс протекает в реакторе под давлением водорода 10,5—17,5 МПа. В настоящее время он используется для получения котельного топлива, но с изменением технологии и увеличением расходования водорода возможно конвертирование угля в перегоняющийся мазут.

Процессы Synthoil и H-Coal предназначены для получения высокомолекулярных жидких продуктов из угля. В обоих этих процессах используется твердый катализатор. Проводятся они в реакторе под высоким давлением. Процесс Synthoil протекает

в сильно турбулизированном потоке угольной пульпы в рециркулирующем масле с водородом над стационарным катализатором. Для H-Coal используется суспендированный катализатор во взвешенном слое углемазляной суспензии с водородом (флюид-процесс).

В обоих процессах можно добиться увеличения выхода низкомолекулярных соединений, близких к нефтепродуктам путем снижения производительности реактора, увеличения рабочего давления или сохранения высокой активности катализатора, осуществляя более частое его обновление.

Процесс переработки угля в растворителе отработан значительно лучше, чем другие процессы «сжижения» угля. В этом процессе используется меньшее количество водорода (менее 534 м³/м³ синтетической нефти), и в настоящее время с его помощью получают беззольный продукт, который застывает при температуре ниже 204,4°C. Содержание серы в нем меньше 0,9% по массе, а теплота сгорания его равна 8890 ккал/кг. Применение такого топлива в котельных, работающих на твердом горючем с точки зрения охраны окружающей среды от загрязнения вполне допустимо. Получаемые топлива исследуются и испытываются. В начале 1976 г. планировалось проведение испытаний в полноразмерной котельной установке. Во время предварительных испытаний оценивалось сгорание топлива в виде жидкого расплава в котельных установках и в газовых турбинах. Недавно Управление энергетических исследований и разработок выдало заказ нефтяной компании «Юниверсал ойл продактс» на оценку возможности применения современной технологии переработки нефти для продуктов, получаемых из угля, с целью производства стандартного топлива. Согласно этому контракту, испытывается первичный продукт, получаемый из угля процессом SRC.

Предусматривается проведение испытаний и в других лабораториях нефтеперерабатывающих заводов жидких продуктов, получаемых указанными выше процессами «сжижения» угля.

Результаты этих испытаний могут помочь в решении важных технологических проблем, связанных с переработкой первичных продуктов переработки угля. До какой степени следует перерабатывать уголь, чтобы можно было получить продукт, который был бы пригоден для дальнейшей переработки на нефтеперерабатывающих заводах и получения требующейся гаммы жидких продуктов? «Сжижение» угля как процесс не идеален с точки зрения использования селективных катализаторов для получения стандартного жидкого топлива. Возможно, что путем дальнейшей переработки, используя более тонкие методы очистки, можно добиться более эффективного превращения первичных продуктов переработки угля, что позволит получить экономические преимущества и повысит эффективность процессов. Таким образом, информация, которая будет получена с нефтеперерабатывающих заводов, и работы по повышению качества первич-

ных продуктов переработки угля будут использованы как обратная связь для совершенствования процессов переработки угля с целью их оптимизации и получения стандартного топлива.

Мы не думаем, что в результате этих работ будет найдена какая-либо одна технологическая схема или один технологический процесс переработки угля, который окажется самым идеальным для получения жидкого топлива. Опыт нефтяной промышленности свидетельствует о том, что в связи с разнообразием сырья, стоимости добычи и транспорта, региональными потребностями в различных нефтепродуктах, сезонными требованиями и местными ценами на конкурирующие топлива приходилось создавать различные проекты нефтеперерабатывающих заводов. Проектировщики нефтеперерабатывающих заводов располагают большим количеством различных конкурирующих технологических вариантов переработки нефти, и тем не менее через 50 лет технического совершенствования методов идеального процесса переработки нефти не появилось.

Уголь и другие виды ископаемого топливного сырья связаны с еще большим количеством факторов, чем нефтяное сырье и некоторые продукты, получаемые из них, весьма чувствительны к конкуренции со стороны легко транспортируемого жидкого топлива. Таким образом, программа использования ископаемого топлива должна оценить многие процессы, специфически подходящие для разнообразного сырья и для удовлетворения различных рынков.

Конечное промышленное внедрение процесса производства синтетического топлива в сильной степени зависит от его эффективности и стоимости. Даже в результате небольшого увеличения эффективности достигается огромная экономия, так как на заводах перерабатывается большое количество материала. В связи с этим необходимо, чтобы программа была нацелена на выработку оптимальных схем процесса. В энергетической программе по ископаемым источникам энергии Управления энергетических исследований и разработок предусматривается непрерывная оценка возможных процессов с целью их сравнения. Эти исследования будут служить для выбора основного направления программы, а также информацией для разработки реальных планов по осуществлению проектов демонстрационных заводов.

Один из проектов демонстрационных установок находится в стадии выполнения. В июле 1974 г. было выдано задание на сооружение демонстрационной котельной установки, не загрязняющей окружающего атмосферного воздуха. 17 января 1975 г. Управление по исследованию угля заключило контракт с компанией «Коалкон» на поэтапное проектирование, сооружение и эксплуатацию демонстрационной установки с производительностью 2600 т/сут, работающей по процессу гидрокарбонизации и вырабатывающей 620 м³/сут газа, пригодного для подачи в газопроводную сеть. Создание этой установки является ближайшей целью угольной программы для получения из угля заменителей

нефтепродуктов и природного газа, используемых электростанциями и промышленными котельными.

Это — первая демонстрационная установка, созданная по заданию Управления энергетических исследований и разработок. Она представляет собой прототип для промышленного внедрения. В то время как проектно-конструкторские работы по созданию этой установки субсидируются правительством, в расходах на ее сооружение и эксплуатацию будет в равной доле принимать участие промышленный партнер. Сооружение установки ведется по ускоренному графику.

На демонстрационной установке будет получаться жидкое топливо для использования на электростанциях или в промышленных котельных, однако качество этого жидкого топлива может быть в последующем улучшено методами, которые в настоящее время проходят испытания. В результате выполнения испытательных программ мы надеемся получить обширную информацию о технологических этапах, которые требуются для производства автомобильного топлива из первичных жидких продуктов, получаемого переработкой угля. Несколько месяцев тому назад с представителями «Дженерал моторс корпорейшн» мы обсуждали вопрос о методах получения и количестве топлива из угля, которые потребуются для определения возможности его применения в качестве автомобильного. Когда будет получено достаточное количество образцов первичного топлива, мы надеемся с помощью имеющихся у нас сведений о процессах дальнейшей переработки подготовить необходимое для реальных испытаний количество автомобильного топлива. На рис. 1 показано количество первичного топлива из угля, которое предполагается произвести на современных лабораторных и будущих полупромышленных установках. Имеющихся в настоящее время ресурсов первичного топлива из угля едва ли хватит для проведения испытаний на нефтеперерабатывающих заводах. В будущем нам потребуется большое количество этих продуктов для проведения крупномасштабных испытаний как технологических процессов, так и самого топлива.

На рис. 1 мы исходим из того, что в 1977 г. установка по производству синтетической нефти введена в строй и вырабатывает 4,8 м³/сут продукта. В 1978 г. предусмотренный программой график выполняется. Вошла в строй крупная полупромышленная установка по гидрогенизации угля, на которой получают от 111 до 286 м³/сут синтетической тяжелой нефти. Если можно будет добиться соответствующего ускорения осуществления нашей программы по сооружению демонстрационной установки, то это будет способствовать увеличению ресурсов синтетической нефти, полученной из угля. Так же, как и для продуктов, полученных на установке процесса SRC, будут проведены испытания на сжигание топлива и получены материалы для транспортного топлива. К тому времени будут разработаны подходящие процессы переработки и оборудование для получения

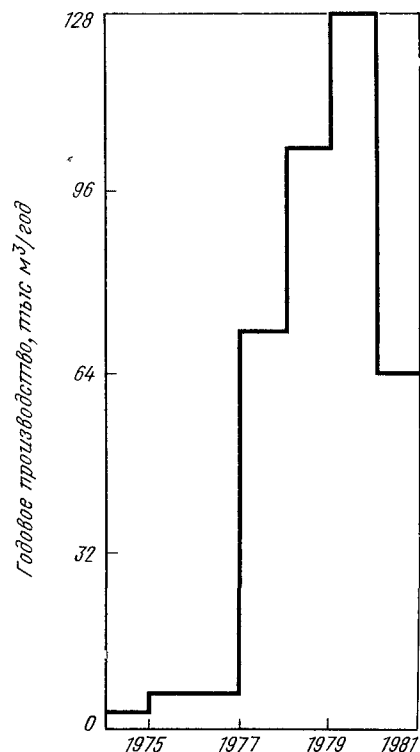


Рис 1 Проектируемые количества первичных продуктов «сжижения» угля

качественного транспортного топлива из угля. Мы будем ждать результатов испытаний и оценки автомобильной промышленностью этого топлива.

Высококалорийный газ. Основная цель программы — это разработка улучшенной технологии производства из угля высококалорийного газа, который можно было бы направить непосредственно в сеть газоснабжения. Усовершенствования технологии, во-первых, должны обеспечить высокоэффективное использование угля и, во-вторых, снизить стоимость производства газа примерно на 20% по сравнению с газом, получаемым по существующей технологии. Основные действующие в этой области проекты представлены в табл. 2.

Несмотря на то, что основной упор в этой части нашей программы делается на производство синтетического газа, близкого к природному, ключевой проблемой остается производство жидкого топлива. При производстве газа для сети газоснабжения на первом этапе осуществляется реакция между углем, кислородом и водяным паром с целью получения смеси водорода и окиси углерода, называемой «Synthesis Gas»¹. Эта газовая смесь представляет собой сырье для получения большого ассортимента продуктов. Путем взаимодействия угля с водяным паром над катализатором получается водород, требующийся для «сжижения» газа. Полученный таким образом водород может использоваться для производства аммиака. Из синтетического газа и азота получают метанол, который может оказаться компонентом автомобильного топлива. Синтетический газ может быть превращен непосредственно в жидкое топливо модифицированным процессом Фишера—Тропша, осуществленным в Южной Африке компанией «Сасол».

Таким образом, программа производства высококалорийного газа Управления энергетических исследований и разработок в состоянии обеспечить сырьем производство жидкого топлива

¹ Газ синтеза

Таблица 2 Заключенные контракты на проекты по производству высококалорийного газа методом газификации

Основной проект	Стоимость проекта, млн. долл.	Контрактор	Местонахождение установки	Срок сооружения
Процесс с промежуточным получением CO ₂ (CO ₂ Acceptor Process)	2,0	Коноко Коал дивелопмент К ^о	Репид-Сити, штат Южная Дакота	В 1975 финансовом году завершено сооружение установки по метанизации
Процесс получения водорода (Hygas Process)	3,0	Институт газовой технологии	Чикаго, штат Иллинойс	В середине 1975 финансового года было завершено сооружение парокислородной установки
Жидкая метанизация (Liquid Methanation)	4,0	Кемикл системс, Инк	Должно быть установлено	В 1975 финансовом году завершено сооружение полупромышленной установки
Процесс агломерации золы из угля (Ash-Agglomerating Process)	1,0	Баттель Колумбус	Вест-Джефферсон	В 1976 финансовом году должно было завершиться сооружение полупромышленной установки
Железо-паровой процесс (Steam-Iron Process)	6,0	Инститют оф гес технолоджи	Чикаго, штат Иллинойс	В 1976 финансовом году должно было завершиться сооружение полупромышленной установки
Процесс производства газа из битуминозного угля (Bi Gas)	13,2	Битуминоз коал рисерч	Ховер-Сити, штат Пенсильвания	В 1976 финансовом году должно было завершиться сооружение полупромышленной установки
Синтан-процесс (Synthane)	9,6	Раст инджиниинг Лумус корпорейшн	Брустаун, штат Пенсильвания	В 1975 финансовом году должно было завершиться сооружение

Мы предполагаем, что разработка экономичных процессов газификации угля при наличии более дешевого водорода позволит повысить эффективность процессов, рассмотренных выше, для получения жидкого топлива. В нашем распоряжении имеется также очень интересный вариант процесса синтеза жидкого топлива непосредственно из основных подготовленных компонентов. В Южной Африке этим способом получают широкий ассортимент нефтепродуктов — от парафинового воска до автомобильного бензина. Принимаются меры для повышения качества бензина, получаемого этим способом, путем подбора более эффективных катализаторов. Успех в работе зависит от того, насколько удастся снизить стоимость производства синтетического газа из угля.

Можно привести некоторые сведения из области производства автомобильного топлива на основе синтетического газа

Как было сказано выше, синтетический газ может быть превращен в метанол. При недорогом синтетическом газе, получаемом из угля, можно будет получать недорогой метанол. Корпорация «Мобил рисёрч энд дивелопмент корпорейшн» в соответствии с контрактом, заключенным с Управлением энергетических исследований и разработок, в лабораторных условиях успешно производит из метанола автомобильный бензин. Бензин отличается высоким содержанием ароматических углеводородов и октановым числом 90—92 по исследовательскому методу. Предварительные испытания на автомобиле свидетельствуют о его высоком качестве. Сейчас ведется проектирование полупромышленной установки. Экономичность промышленного производства будет зависеть от стоимости метанола и успешного сочетания процессов газификации угля, получения метанола и превращения метанола в автомобильное топливо.

Достижение успеха в производстве значительного количества автомобильного топлива из угля требует решения различных технических и снабженческих вопросов.

К ним относятся:

1. Создание необходимых мощностей для увеличения добычи угля.

2. Экономичность процессов «сжижения» угля и переработки первичного жидкого продукта, получаемого из него.

3. Помощь правительства для избежания экономического риска, связанного с конкуренцией с нефтью.

Добыча угля. Для производства более или менее значительного количества жидкого топлива из угля потребуется увеличение размеров добычи угля. Это увеличение будет происходить наряду с ростом потребностей угля для выработки электроэнергии и производства стали. При планировании производства жидкого и газообразного топлива из угля учитываются проблемы, связанные с увеличением добычи угля. Согласно ряду исследований по этому вопросу, добыча угля в США к 1985 г. должна достигнуть 2 млрд. т в год. Для этого потребуется увеличить добычу угля втрое по сравнению с добычей в 1974 г., когда она составляла примерно 600 млн. т.

Недостатком этих исследований так же, как и всех исследований, рассматривающих проблему в целом, является то, что они учитывают макрофакторы и часто не учитывают микрофакторы, которые могут иметь большое значение. Тем не менее на основании этих исследований можно сделать ряд интересных выводов. Мы располагаем крупными запасами угля, достаточными для обеспечения добычи свыше 2 млрд. т в год. Потребуется значительные кадры рабочих для увеличения объема открытой добычи угля, которая предположительно в 1985 г. составит около 56% всей добычи. Возможен недостаток рабочей силы (до 20%) для подземной добычи угля, которая потребуется для достижения максимального уровня добычи 1985 г. Возникнет необходимость в значительных ресурсах воды. Были учтены

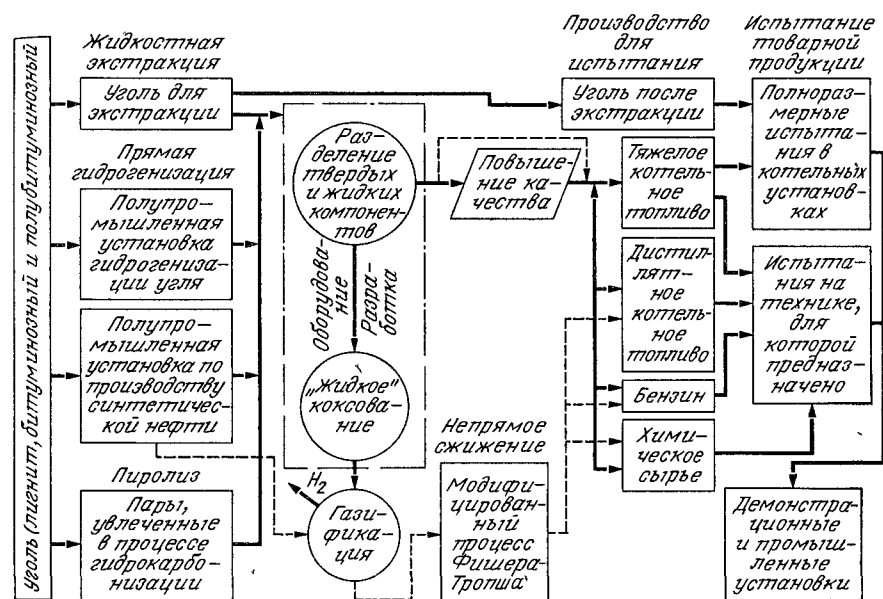


Рис. 2 Направления деятельности Управления энергетических исследований и разработок

потребности в транспорте, в капиталовложениях, в оборудовании. Если будут приняты необходимые меры стимулирования, то все эти проблемы будут решены.

Вместе с тем следует иметь в виду, что, хотя обеспеченность водой не является проблемой, когда речь идет о регионе в целом, но при оценке ее ресурсов на конкретных участках запасы воды не всегда достаточны. Для увеличения объема перевозок будут необходимы дополнительные капиталовложения в железнодорожный подвижной состав. Расширение производства угледобывающего оборудования потребует более тщательного исследования, чем это принято при общем подходе. Исследования должны быть направлены на изучение вопросов, непосредственно касающихся расширения добычи угля, а не смежных проблем, таких, как потребности в электрооборудовании.

Совершенно очевидно, что как добыча угля, так и его переработка в жидкое или газообразное топливо будут зависеть от действия соответствующих государственных учреждений. Конгресс рассмотрел несколько законопроектов, касающихся этого вопроса. Правительство обнаружило потенциальные возможности разработки нескольких программ, которые могли бы оказать помощь промышленности. В настоящее время никто не может предсказать, какая из этих программ будет одобрена. Можно только предполагать, что в течение ближайших лет такой план будет утвержден. Программа Управления энергетических исследе-

дований и разработок преследует цель поиска различных путей для ускорения принятия решения.

План «сжижения» угля в соответствии с нашей программой приводится на рис. 2. На этом рисунке слева схематично показаны различные типы исследуемых процессов. В центре приводятся основные этапы, являющиеся общими для всех процессов «сжижения» угля. К ним относятся отделение тяжелых первичных жидких продуктов от твердого остатка, газификация остатка и тяжелых жидких продуктов с целью получения водорода, требующегося для процесса «сжижения» угля. Справа на рисунке приводятся исследования, проводимые в области разработки процессов переработки продуктов «сжижения» угля в пригодное для использования стандартное топливо. Когда будет произведено достаточное количество топлива, то для испытания будут подготовлены образцы, удовлетворяющие нормативам. В процессе внедрения этих топлив мы надеемся на кооперацию с автомобильной промышленностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Не представляется возможным определить, в какой мере будет выполнена программа Управления энергетических исследований и разработок по углю. Однако совершенно уверенно можно сказать, что в ближайшие несколько лет количество жидкого топлива, получаемого из угля, будет значительно меньше, чем количество топлива, получаемого из нефти. Следует считать, что наиболее вероятным способом повышения качества топлива, получаемого из угля, будет переработка жидких фракций на обычных нефтеперерабатывающих заводах совместно с нефтяным сырьем. Именно на этом делается упор в наших исследованиях, а также Управлением энергетических исследований и разработок совместно с нефтеперерабатывающими компаниями и другими квалифицированными специалистами в области оценки возможности переработки на существующих нефтеперерабатывающих заводах комбинированного сырья. Кроме того, будет получено реальное автомобильное топливо, которое удовлетворит техническим требованиям автомобильной промышленности.

Так же как и прежде, Управление энергетических исследований и разработок надеется на обмен информацией с инженерами, которые определяют конструкцию двигателей и топливо для них. Мы надеемся, что такая кооперация будет полезной.

ОБСУЖДЕНИЕ

Х. Ф. Мэсон (компания «Шеврон рисёрч К°»). Что Вы подразумеваете под «модифицированным» процессом Фишера—Тропша?

Кларк. Проводится большая работа по усовершенствованию катализаторов, применяемых в процессе Фишера—Тропша. Эти

работы в основном запатентованы. В новом варианте процесса достигнуто еще одно преимущество по сравнению со старым процессом Фишера—Тропша. Основное стремление как в процессе Фишера—Тропша, так и в процессе гидрогенизации угля заключалось в снижении выхода метана и этана. Это объяснялось тем, что в Европе метан и этан не находят спроса, если не считать их использования в качестве топлива. В США вследствие доступности очень дешевого природного газа потребление метана и этана держалось на низком уровне. В настоящее время это положение изменилось. По нашим прогнозам, новая установка Фишера—Тропша будет совершенно иной, а средний молекулярный вес получаемого продукта — меньше. Раньше этого нельзя было делать, потому что получалось очень много метана. Теперь, когда стоимость природного газа приближается к 16 долл за 1 млн. ккал, получение метана становится положительным фактором.

В настоящее время появилась возможность использовать процесс Фишера—Тропша для удовлетворения потребностей США и в природном газе. Такой природный газ будет обходиться дороже, но в то же время гибридная установка, на которой можно будет одновременно получать как природный газ, так и жидкое топливо, будет иметь большое преимущество для экономики нашей страны.

Вот, что я понимаю под термином «модифицированный» процесс Фишера—Тропша.

С. С. Пеннер. (Калифорнийский университет, Сан-Диего). Сколько будет стоить, согласно Вашей оценке, в оптимальном варианте получение одного кубометра жидкого топлива, производимого из угля?

Кларк. Я думаю, что один кубометр будет стоить что-нибудь между 94,35 и 157,24 долл. Однако необходимо иметь в виду, что инфляция может вызвать крупные изменения в величине капиталовложений для сооружения установки и соответственно резкие изменения в стоимости получаемого бензина. На основании изучения экономической структуры завода по производству синтетического топлива было показано, что капиталовложения составляют примерно 65—80% от стоимости продукта. Стоимость угля составляет 15—16%. На долю рабочей силы, катализатора и химических реагентов вместе приходится 5—8%. Снижение стоимости капиталовложений на 20% позволило бы намного увеличить эффективность процесса Фишера—Тропша, а также процесса производства синтетического природного газа.

Дж. В. Ходгсон (Университет, штат Теннесси). Многих волнует вопрос относительно возможной канцерогенной природы жидкого топлива, получаемого из угля. Можете ли Вы что-нибудь сказать об этом?

Кларк. Этот вопрос имеет очень большую историю. История началась с того времени, когда фирма «Эксон» установила канцерогенную природу остатка процесса каталитического кре-

кинга. Фирмой была выполнена замечательная работа. Подобная работа была проделана фирмой «Юнион карбид», когда они начали эксплуатировать свою установку по гидрогенизации угля в Южном Чарлстоне. Я думаю, что разумные меры предосторожности должны быть приняты. Такие предосторожности принимаются и в настоящее время при переработке тяжелых нефтяных фракций. К счастью, очень небольшое число летучих материалов, образующихся в процессе «сжижения» угля, относится к разряду канцерогенных. Канцерогенные вещества содержатся в основном в нелетучей части. Таким образом, придется иметь дело с проблемами контакта и аэрозольной проблемой. В общем много еще проблем, которые надо решить. Мы продолжаем исследования в направлении обеспечения того, чтобы в каждом процессе не образовывались материалы, которые могут быть сильно канцерогенными. Мне кажется, что в области переработки приняты достаточные меры контроля для решения этой проблемы. Может возникнуть проблема, связанная с увеличением канцерогенных веществ в отработавших газах автомобилей, использующих топлива с большим содержанием ароматических углеводородов, но я не в курсе этого вопроса.

ПРОИЗВОДСТВО И СВОЙСТВА МОТОРНОГО ТОПЛИВА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

Дж. Х. ГЕРИ

Горное училище Колорадо, Голден, штат Колорадо, США

Горючие сланцы штатов Колорадо, Вайоминга и Юта не являются сланцами, содержащими горючую смолу. Они состоят в основном из плотного малопористого мергеля, напоминающего известняк. Органическая часть горючих сланцев является уплотненным материалом, называемым керогеном. Кероген не плавится, ограниченно растворяется в таких растворителях, как бензол, ацетон и эфир. Чтобы вызвать разложение керогена и получить из него жидкую сланцевую смолу, газы и углерод, необходимо его подвергнуть пиролизу при температуре 480°C.

Органического вещества в сланцах западных штатов содержится примерно 14% по массе. Пиролизом из него может быть получено от 95 до 151 л (проба Фишера) сланцевой смолы на тонну породы. Используются двумя методами получения из керогена сланцевой смолы. Один из них заключается в сухой перегонке сланца в ретортах, а другой — в подземной перегонке в подготовленном для этого месторождении.

Сланцевая смола, полученная при сухой перегонке сланцев, отличается высоким содержанием ненасыщенных углеводородов, азота и серы. Для получения из этого сырья автомобильного топлива требуется его переработка более сложная, чем применяемая для получения автомобильного топлива из нефти.

В работе рассматриваются основные свойства сланцев и сланцевой смолы, методы сухой перегонки сланцев и переработки сланцевой смолы, а также свойства получаемого моторного топлива.

Характеристика и размещение запасов горючих сланцев. При термическом разложении горючих сланцев выделяется парафинистая нефтеподобная жидкость, которая при комнатной темпе-

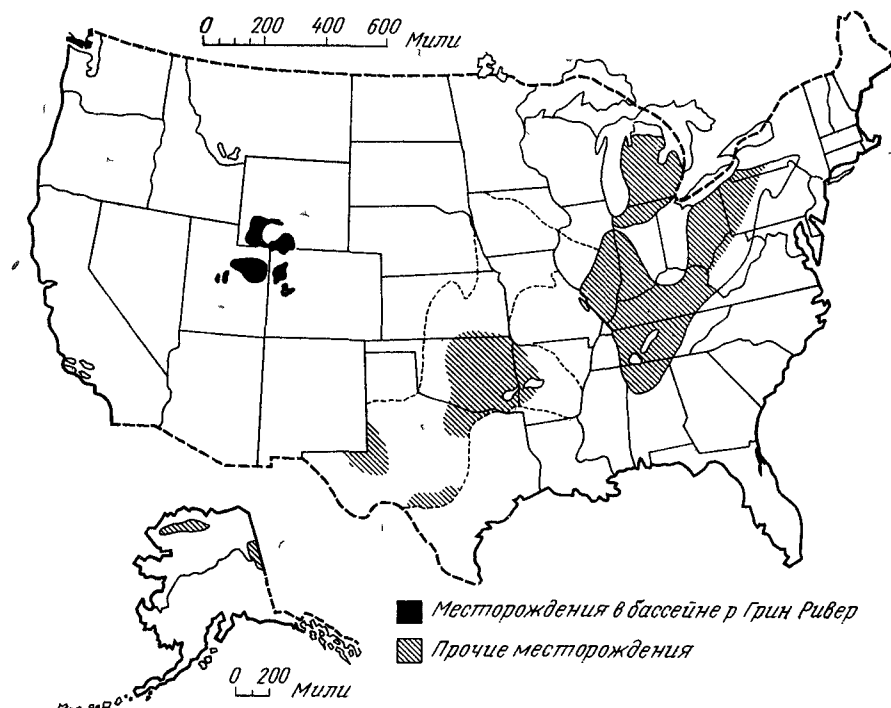


Рис. 1 Основные известные месторождения горючих сланцев в США

ратуре находится в твердом состоянии. Это побудило профессора Эдинбургского университета Крум Броуна назвать это вещество «керогеном», что на греческом языке означает содержащее парафин.

Значительные запасы горючих сланцев имеются по крайней мере в восьми штатах США (рис. 1), а также в 23 зарубежных странах. Однако крупнейшие сосредоточены в осадочных породах формации Грин Ривер штатов Колорадо, Юта и Вайоминг. Мощности пластов здесь достигают 3 м и более. Из этих сланцев может быть получено свыше 57 л смолы на 1 т породы. Согласно оценке, в этих отложениях около 286 млрд. м³ сланцевой смолы. Площадь, занимаемая ими, равна примерно 4455 тыс. га. В лучшей части месторождений с тонны сланца можно получать более 95 л смолы. Запасы такой породы эквивалентны 95 394 млн. м³ сланцевой смолы [1].

Районы штатов Колорадо, Юта и Вайоминг, в которых размещены месторождения горючих сланцев, характеризуются малыми осадками.

Богатейшая зона с горючими сланцами в бассейне Пайсанс Крик давно известна под названием Махагониевой зоны из-за своего цвета и выходов пластов, богатых горючими сланцами, на поверхность. Мощность пластов в Махагониевой зоне

колеблется от 23 до 69 м и более. Они занимают площадь свыше 319 000 га. Последующие исследования показали, что под Махагониевой зоной находится другой богатый пласт и вблизи центра Паисанского бассейна имеются следующие друг за другом пласты на 458 м ниже поверхности верхнего пласта Махагониевой зоны [2].

Ниже приводится типичный состав горючих сланцев штатов Колорадо и Юта из Махагониевой зоны, из которых получается 95 л сланцевой смолы на тонну породы [3, 4].

Типичный состав горючих сланцев, % по массе

Органическое вещество	13,8
Минеральные вещества	
карбонаты (доломит)	41,3
полевые шпаты	18,1
кварц	11,2
глины (иллит)	11,2
анальцит	3,4
пирит	1,0
Всего	100,0

Содержание органического вещества в сланцах западных штатов в среднем составляет от 12 до 20% по массе и пиролизом из них можно получить от 57 до 151 л сланцевой смолы на тонну породы.

Переработка горючих сланцев. Перед сухой перегонкой (мы сейчас будем говорить о методах сухой перегонки на поверхности) породу, извлеченную из пласта, измельчают. Измельченную породу с помощью ленточных транспортеров направляют в реторты.

На реторте горючий сланец подвергается пиролизу при температуре 480—540°C. Кероген сланца разлагается с образованием газа и паров сланцевой смолы. Процессы сухой перегонки сланцев могут быть разделены на два типа — с прямым и косвенным обогревателем. Процесс, в котором образующийся газ сгорает, является типичным процессом с прямым нагревом (например, процесс Paraho). Процесс компании TOSCO является единственным процессом с косвенным обогревом. Он был испытан на полупромышленной установке производительностью 1000 т сланцев в сутки.

Реторта для сухой перегонки горючего сланца с сжиганием газа (рис. 2) представляет собой вертикальную облицованную изнутри огнеупорным кирпичом камеру, в которой измельченный сланец непрерывно движется вниз и нагревается до температуры сухой перегонки поднимающимися вверх горячими газами, контактирующими с твердым веществом. Рециркулирующие газы, подаваемые в низ реактора, охлаждают отходы сухой перегонки сланца и при этом сами нагреваются почти до температуры перегонки. В точке, отстоящей примерно на одну треть от низа, горючие сланцы смешиваются с нагнетаемым воздухом, что приводит к их регулируемому сгоранию. Дополнительное тепло,

требуемое для сухой перегонки, получается при сгорании рециркулирующих газов и некоторой части углистых отложений, остающихся на выходящей зональной части сланца. Газы нагревают сланец в зоне, расположенной непосредственно над местом ввода воздуха в реторту, до 480°C или выше. При этом кероген термически разлагается, выделяя пары сланцевой смолы и горючие газы. Горючие газы с парами сланцевой смолы, продвигаясь вверх, охлаждаются поступающим сверху свежим сланцем, выводятся из реторты и направляются в систему охлаждения и разделения. Разделение сланцевой смолы осуществляется путем пропуска охлажденных паров и газов через специальный холодильник, откуда часть горючего газа возвращается в реторту сухой перегонки. Остальная часть газа с теплотой сгорания 700—900 ккал/м³ используется в качестве низкокалорийного топлива.

При сухой перегонке сланцев образуется и вода в количестве 8—20 л на тонну породы. Пары выводятся из реактора с общим потоком. Большая их часть конденсируется вместе с парами сланцевой смолы. После отделения вода содержит различные органические и неорганические вещества, которые должны быть удалены перед ее последующим использованием для гашения зольной части сланца, выводимого из реторты после разложения керогена. Печь, используемая в процессе Paraho, аналогична реторте для сухой перегонки сланца, но оснащена распределительными решетками, позволяющими нагнетать газ для нагрева содержимого реторты на различных уровнях.

Процесс компании TOSCO (рис. 3) использует печь косвенного нагрева, в которой тепло сланцу передается через нагретые керамические шары. Порода измельчается, предварительно подогревается и направляется в загрузочное устройство печи с керамическими шарами, нагретыми отходящими газами. Печь, где протекает пиролиз сланца, представляет собой вращающийся барабан, в котором порода нагревается керамическими шарами до 480°C за счет конвекции и лучеиспускания. Происходит разложение керогена с образованием паров сланцевой смолы

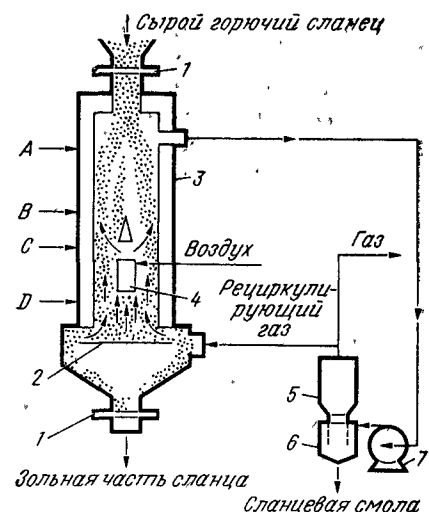


Рис. 2. Схема установки для сухой перегонки горючего сланца с сжиганием газа:

1 — газовое уплотнение; 2 — дисковый питатель; 3 — реторта; 4 — смесительная камера; 5 — электростатический смеситель; 6 — центробежный сепаратор; 7 — воздуходувка; Зоны: А — охлаждения продуктов распада керогена; В — сухой перегонки; С — сжигания газа; D — теплообмена

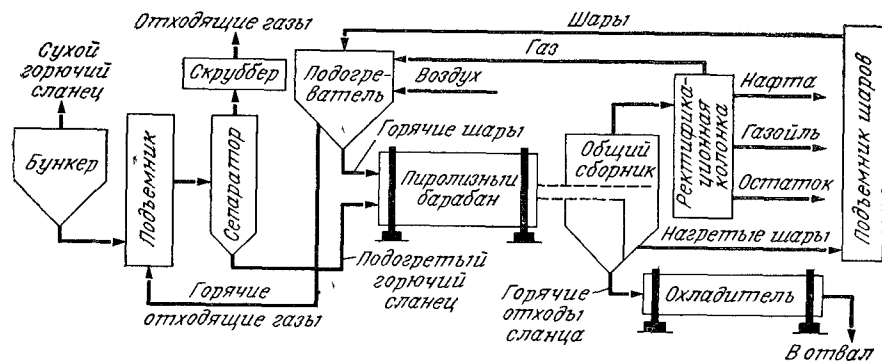


Рис 3 Схема процесса TOSCO II

и газов. На зольном остатке сохраняются углистые отложения. Выходящие из печи продукты направляются для отделения керамических шаров от зольной части сланца. Горячие пары газа направляются в колонку, в которой смесь частично конденсируется и разделяется на воду, сланцевую смолу и горючий газ с теплотой сгорания около 790 ккал/м³.

Отделенные керамические шары направляются элеватором в подогреватель, в котором они нагреваются до 670°C сжиганием части горючего газа, получаемого в процессе, и возвращаются в цикл.

Отделяемая вода используется для гашения зольной части сланца. Предварительно она очищается. На тонну перерабатываемого сланца приходится 8—19 л воды. На установку производительностью 7950 м³/сут сланцевой смолы, перерабатывающей горючий сланец с содержанием по Фишеру 95 л смолы на тонну, образуется 650—1600 м³ воды в сутки.

Подземная переработка сланцев. Ряд нефтяных компаний и Горное бюро США в течение нескольких лет проводили эксперименты по подземному производству сланцевой смолы. Для этого горючие сланцы непосредственно в пласте нагревались до температуры сухой перегонки 450—540°C путем сжигания части сланца или введением горючих газов, например природного газа, или перегретого водяного пара в качестве теплоносителей.

Основным преимуществом подземной переработки горючих сланцев является то, что в этом случае исключается необходимость его добычи, транспортирования к установке сухой перегонки и удаления зольной части, остающейся после сухой перегонки сланца в качестве отхода.

При наземной переработке сланцев приходится извлекать из недр очень большое количество породы. Например, для производства одного кубометра сланцевой смолы из горючего сланца, содержащего 95 л ее на тонну, необходимо добыть, транспортировать и измельчить 6,3—9,4 т породы. Для обеспечения

работы установки по производству 15,9 тыс. м³ сланцевой смолы в сутки необходимо ежесуточно подавать на установку 150 тыс. т измельченного сланца

На крупнейших в мире шахтах с подземной переработкой ежесуточная производительность составляет 60 тыс. т, а с открытой добычей в карьере — около 300 тыс. т/сут; 80% перерабатываемого наземным способом горючего сланца идет в отход, как зольный остаток. Трудность удаления отхода возрастает в связи с тем, что его объем примерно на 12% больше объема горючего сланца.

Для подземной сухой перегонки горючего сланца требуется способ проникновения в пласт и нагнетания теплоносителя, что обеспечивало бы пиролиз керогена непосредственно в пласте

Горючий сланец имеет низкую теплопроводность (подобно огнеупорному кирпичу). В связи с этим приходится пользоваться эффективным тепловым потоком.

В одном из испытанных методов подземной сухой перегонки в горючем сланце были пробурены скважины, аналогичные тем, которыми в настоящее время пользуются для заводнения или нагнетания газа в нефтяные коллекторы. Такие схемы обычно состоят из центральной нагнетательной скважины, окруженной эксплуатационными, или продуктивными, скважинами. Между скважинами требуется создание горизонтальных разрывов с целью образования проходов воздуху, обеспечивающему горение, или горючим газам и для перемещения паров сланцевой смолы к продуктивной скважине. Интервалы между скважинами зависят от естественных разрывов, расстояния между разрывами, характера залегания пластов и общей экономики [4, 5, 6].

Проницаемость месторождений горючих сланцев очень незначительна или вообще отсутствует. Возможно, что наибольшее значение при подземной переработке горючих сланцев имеет обеспечение достаточной проницаемости месторождения. Для этого могут использоваться взрывы (ядерные или обычные), гидравлические и электроразрывы пласта, комбинации тех или иных методов и вымывание породы [6].

Недавно получил известность метод Герретта, состоящий в подземной подготовке месторождения и сухой перегонки в нем. Для его осуществления требуется пласт горючего сланца достаточной мощности, расположенный на достаточной глубине. В этом случае 10—25% горючего сланца, находящегося в намеченном участке месторождения, добывается обычным камерно-столбовым способом и транспортируется к установке для сухой перегонки. Затем на выработке бурят вертикальные скважины, набивают их взрывчатыми веществами, которые подрывают. Полное пространство заполняется дробленым сланцем, который подвергается сухой перегонке под землей путем циркуляции через этот слой сжигаемого газа или теплоносителя в виде горячих газов. Образующиеся пары сланцевой смолы и газы извлекаются на поверхность для дальнейшей переработки.

Таблица 1 Свойства сланцевой смолы, полученной в процессе TOSCO II и обычных нефтей [7]

Параметры	Обычная нефть	Сланцевая смола, полученная в процессе TOSCO II
Плотность, кг/м ³	0,8063—0,9659	0 9218
Содержание по массе		
серы, %	0 04—4 1	0,8
азота, %	0,01—0,65	1,9
никеля частей на млн	(0,03—45) 10 ⁻³	5
ванадия » » »	(0,002—348) 10 ⁻³	3
мышьяка, » » »	(0—0,030) 10 ⁻³	40
Вязкость в универсальных секундах Сей-болта при 37 8°C	31-1025	106
Коксуемость по Конрадсону, % по массе	0,1—11,4	4 6
Бромное число	Ничтожно малое	49,5

Переработка сланцевой смолы Сланцевая смола отличается высокой плотностью, средним содержанием серы, высоким содержанием азота и высоким содержанием ненасыщенных углеводородов (табл. 1) Вязкость и температура застывания сланцевых смол выше, чем у многих нефтяных фракций с той же плотностью

Для того чтобы сланцевую смолу можно было транспортировать по трубопроводам в холодную погоду, необходимо снизить ее вязкость и температуру застывания до определенного уровня, а следовательно, потребуется использование таких дополнительных процессов, как висбрекинг, каталитическая гидроочистка или гидрокрекинг, которые должны осуществляться на установке или вблизи установки сухой перегонки горючих сланцев. Говоря вообще, производство удовлетворительного автомобильного топлива из горючих сланцев связано с более глубокой переработкой и большими расходами, чем производство соответствующего автомобильного топлива из нефти

Висбрекинг представляет собой процесс умеренного крекинга, при котором разрушаются тяжелые парафиновые и олефиновые молекулы на молекулы с меньшей молекулярной массой. Тем самым снижается вязкость и температура застывания сланцевой смолы. Этот процесс выполняет две роли: обеспечивает удовлетворительную перекачку продукта по трубопроводам в холодную погоду и снижает расходы на перекачку в течение всего года.

Каталитическая гидроочистка сланцевой смолы в районе установки сухой перегонки сланцев позволяет исключить некоторые процессы переработки, которые пришлось бы проводить, если бы сланцевая смола в районе установки сухой перегонки подвергалась висбрекингу. Недостатком этого процесса является то, что для его осуществления требуется значительное количество водорода или использование легкой части продукта для

производства водорода. Каталитическая гидроочистка позволяет снизить не только вязкость и температуру застывания продукта, но и содержание серы, азота и донасытить ненасыщенные компоненты водородом.

Существует целый ряд процессов, включающих каталитическую гидроочистку, которые могут быть использованы для повышения качества сланцевой смолы. В программах по охране окружающей среды от загрязнений и выдаче лицензий на переработку горючих сланцев, разработанных как министерством внутренних дел США [1], так и специальной группой по горючим сланцам Государственного нефтяного совета для технологических процессов по переработке горючих сланцев, предусматривается схема, включающая фракционирование, замедленное коксование и гидрокрекинг. Эта схема рассматривается ниже.

Согласно этой схеме, сланцевая смола подогревается и частично испаряется, направляясь в дистилляционную колонну. В дистилляционной колонне в результате фракционирования газ отбирается с верха колонны, фракции лигроина и легкого газойля — по высоте колонны, а тяжелый остаток — снизу. Тяжелый остаток направляется на коксование. Производство кокса сопровождается термическим крекингом сырья с образованием паров газойля, лигроина и газа.

Газ из дистилляционной колонны направляется на очистку, при которой отделяются сероводород, аммиак, низкомолекулярные меркаптаны, двуокись углерода и низкокипящие сульфиды. Остальные сернистые соединения затем отделяются на установке по очистке от серы.

Лигроин и газойль подвергаются гидроочистке. При этом удаляются сера в виде сероводорода, азот в виде аммиака и донасыщаются ненасыщенные углеводороды. После гидроочистки получают продукты с небольшим содержанием серы, азота, стабильные при хранении, которые называют синтетическими нефтепродуктами.

Свойства очищенной сланцевой смолы

Плотность	0,7963
Содержание	
серы, % по массе	0,005
азота, % по массе	0,035
Температура застывания, °C	ниже 10
Вязкость в градусах Сейболта при 37,8°C	40

Аммиак и сероводород разделяются, из сероводорода на установке Клауса получают элементарную серу.

Автомобильное топливо из сланцевой смолы. Товарное автомобильное топливо из сланцевой смолы получено уже рядом компаний, но лишь немногими опубликованы полученные результаты. Одно из последних исследований было проведено Управлением по исследованию энергетики и природных ресурсов ВМФ. Из тысяч кубометров сланцевой смолы, полученной наземной

Таблица 2 Свойства синтетических моторных топлив, полученных из сланцевой смолы

Параметры	Бензин [8]	Дизельное топливо			Реактивное топливо	
		1-D [11]	2-D [11]	4-D [11]	IP-5/let A [8]	IP-4/let B [8]
Фракционный состав						
10% объемных	54,4	204,4	227,8	232,2	191,1	111,1
20% »	64,4	209,4	234,4	242,2	197,2	121,1
50% »	101,7	216,7	251,1	263,9	216,7	144,4
90% »	163,3	242,8	280,6	318,3	250,0	186,7
Конеч кипения, °C	196,1	269,4	290,0	331,1	270,0	207,2
Остаток, % объемных	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	1,0
Упругость паров по Рей-ду, мм рт ст	425,2	—	—	—	—	103,7
Октановое число по исследовательскому методу	82	—	—	—	—	—
Октановое число по моторному методу	91	—	—	—	—	—
Коррозия медной пластинки	1A	—	—	—	1B	1B
Содержание фактических смол, мг/100, мл	2,8	—	—	—	—	—
Содержание $\times 10^4$, в % по массе						
серы	30	100	200	200	27	13
азота	—	141	166	202	—	—
Температура вспышки, °C	—	86,7	100,0	129,4	60,0	—
Температура застывания, °C	—	-17,8	-17,8	-6,7	-32,2	-68,3
Плотность, кг/л	—	0,8160	0,8260	0,8299	0,8063	0,7507
Коксуемость по Конрад-сону 10% остатка	—	0,14	0,16	0,36	—	—
Зольность, % по массе	—	0,001	0,001	0,001	—	—
Вязкость в сантистоксах при 37,8°C	—	1,66	2,40	2,96	—	—
Цетановое число	—	48	54	56	—	—
Низшая теплотворная способность, ккал/кг	—	—	—	—	10090	10190
Содержание ароматических углеводородов, % объемных	—	—	—	—	21,0	11,7
Содержание олефиновых углеводородов, % объемных	—	—	—	—	4,3	0,4

сухой перегонкой (Paraho), были приготовлены бензин, реактивное, дизельное и тяжелое котельное топливо [8].

Кроме того, в лабораторных условиях были получены автомобильный бензин, дизельное и форсуночное топливо Ларамийским исследовательским центром и Управлением энергетических исследований и разработок (табл. 2). Обобщенные выводы, приведенные ниже, представляют собой анализ обоих исследований.

Бензин из сланцевой смолы может удовлетворять всем требованиям стандарта ASTM и военного стандарта Military F-46,

за исключением требования стабильности к окислению. Согласно нормам спецификации F-46, минимальный индукционный период должен быть равен 480 мин, а индукционный период полученного бензина — менее 360 мин. Стабильность к окислению является мерой смолообразования при хранении и обычно обуславливается наличием ненасыщенных соединений в бензине. Устранение этого недостатка может быть достигнуто дополнительной гидрогенизацией в более жестких условиях [3, 9, 10].

В лабораторных условиях было получено дизельное топливо, удовлетворяющее требованиям стандарта ASTM-D-975 для сортов № 1D, 2D и 4D. Однако некоторые трудности возникли на заводе компании «Гери вестерн рифайнери» в Гильсонайте (штат Калифорния) вследствие недостатков оборудования для гидроочистки. Полученное топливо отличается высоким содержанием парафина и смол и поэтому не удовлетворяет нормативам в части температуры застывания и термической стабильности. Можно надеяться, что после устранения недостатков в оборудовании для гидроочистки не возникнет подобных проблем.

На заводе компании «Гери вестерн рифайнери» было получено топливо для авиационных газовых турбин, которое полностью удовлетворяло требованиям, спецификаций ASTM-D-1655 на реактивное топливо Jet A и Jet B и военным спецификациям MIL-T-56245 на сорта IP-4 и IP-5, за исключением некоторого несоответствия по температуре начала кристаллизации и низшей теплотворной способности.

При проведении процесса в более реальных условиях ни одна из этих проблем не должна возникнуть.

ВЫВОДЫ

В итоге можно сделать вывод, что, согласно оценке, в стране может быть налажена промышленность, которая будет производить от 159 до 239 тыс. м³ сланцевой смолы в сутки. Это соответствует 5—10% суточного потребления в стране нефти.

В нашем распоряжении имеется технология переработки горючих сланцев западных штатов и получения автомобильного топлива, удовлетворяющего современным нормативам. Однако для их производства требуются процессы с более жесткими условиями, чем при переработке нефтей. В результате получение синтетического автомобильного топлива из горючих сланцев будет обходиться дороже, чем производство современного топлива из нефти.

ОБСУЖДЕНИЕ

С. Л. Мейзел (компания «Мобил рисёрч энд дивелопмент»). Вы говорили, что в связи с проблемой обеспечения водой при наземной сухой перегонке горючих сланцев добыча последних ограничена 159—239 тыс. м³/сут сланцевой смолы. Справедли-

во ли подобное ограничение для подземной переработки горючих сланцев?

Гери Предельные показатели 159—239 тыс. м³/сут сланцевой смолы обусловлены не только ресурсами воды. Они связаны также и с другими проблемами. Основная из них — недостаток рабочей силы для обеспечения потребностей горнодобывающей промышленности. Мы не располагаем достаточным количеством людей, работающих в этой области. Если подключить к этому новые партии рабочих, то для них придется строить города. Надо будет сооружать школы. Надо будет развернуть различную деловую деятельность и все это связано со значительным увеличением числа занятых людей. Это означает, что потребуются сооружения сантехнической системы, системы водоснабжения и др. Этими обстоятельствами и обусловлен предел производства 159—239 тыс. м³/сут сланцевой смолы.

Что касается подземной переработки горючих сланцев, то она также связана с большей частью перечисленных выше проблем, которые ограничивают возможности ее расширения. При применении для переработки горючих сланцев метода Герретта, соответствующие показатели будут зависеть от того, какое количество горючих сланцев придется поднимать на поверхность, но наиболее оптимистические характеристики получаются при добыче от 10 до 15%, перерабатываемых в пласте. Это соответствует минимальному количеству, которое должно быть добыто. Для того чтобы получать 159 тыс. м³/сут сланцевой смолы, необходимо добывать от 250 000 до 400 000 т горючих сланцев в сутки, а это большее количество.

Если бы нам удалось разработать процесс подземной сухой перегонки горючих сланцев, который был бы связан только с бурением скважин и гидравлическим разрывом пласта, то, возможно, не было бы необходимости устанавливать ограничительные пределы.

Дж. П. Лонгвелл (компания «МИТ энд Эксон») Добыча битуминозных песков на кубометр получаемой нефти в Канаде примерно соответствует соотношению добычи горючих сланцев и получаемого количества сланцевой смолы, о которых Вы здесь говорили. В Канаде выполняют эту большую работу и, как мне кажется, планируют увеличить ее объем до размеров добычи, сравнимых с теми, о которых Вы здесь говорили. Что же касается большого объема переработки твердых материалов, то они проводят некоторые экспериментальные работы по более ускоренному графику.

Гери В Канаде, так же, как и в США, работы по добыче сырья ведутся открытым способом, в том числе по добыче битуминозных песков, поэтому этот процесс в некоторой мере сравним с добычей горючих сланцев. Но у канадцев, возможно, нет такой серьезной проблемы, как удаление отходов переработки горючих сланцев, их не лимитируют ресурсы воды, поскольку они располагают большими ее ресурсами.

ВЛИЯНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ НА ТОПЛИВО ДЛЯ ТРАНСПОРТА

Дж. Л. РАССЕЛ

Компания «Дженерал атомикс», Сан-Диего, штат Калифорния, США

Для будущего ядерные реакции представляют потенциально неограниченный источник энергии. Однако из-за громоздкости источники ядерной энергии трудно приспособить для транспортных средств.

В ближайшем будущем ядерная энергия будет оказывать влияние на производство различных видов топлива для транспорта лишь за счет вытеснения нефтяных топлив из сферы электроэнергетики в другие области. В настоящее время в США на атомных электростанциях производится около 9% потребляемой в стране электроэнергии. К 1980 г. эта доля достигнет 15—20% и будет быстро увеличиваться.

До 2000 г. ядерная энергия может использоваться и в качестве источника технологического тепла на установках по газификации и «сжижению» угля. Ядерная энергия может быть также использована для разложения воды на кислород и водород, необходимый для химической и топливной промышленности. Возможно применение жидкого водорода непосредственно в качестве топлива для крупных самолетов с большим радиусом действия. При помощи ядерной энергии можно форсировать добычу природного газа, когда его добыча другими способами станет неэкономичной.

Когда-либо в будущем применение топлива, получаемого из горючих ископаемых, на транспорте станет неэкономичным из-за его высокой стоимости. Целесообразнее станет использовать такое топливо в других областях. Когда это произойдет, зависит от многих факторов.

Однако, очевидно, что, получаемые с помощью ядерной энергии водород, аммиак и электроэнергия будут ценными потенциальными заменителями углеводородсодержащего топлива.

Введение Термин «ядерная энергия» охватывает обычно четыре способа ее производства: в реакторах на тепловых нейтронах, в реакторах-размножителях, в термоядерных реакторах и при ядерных взрывах.

Эти способы практически могут служить в будущем неограниченным источником энергии.

Однако на транспортных средствах, за исключением судов, эти способы производства ядерной энергии не могут быть использованы.

В настоящее время нашел практическое применение в качестве экономически оправданного источника энергии лишь один способ производства ядерной энергии — в реакторах на тепловых нейтронах.

В США примерно 9% электроэнергии получают в настоящее время на атомных электростанциях, используя реакторы на тепловых нейтронах.

Освоение реакторов-размножителей входит в программу финансируемой Федеральным правительством. Есть надежда, что их начнут использовать до конца двадцатого столетия.

Термоядерные реакторы являются весьма обещающими, но реальные технические образцы таких реакторов пока еще не

созданы. Тем не менее успехи последних лет позволяют надеяться, что к концу нынешнего десятилетия такие реакторы будут созданы. В таком случае термоядерные реакторы могут найти применение в народном хозяйстве к началу следующего столетия.

Использование энергии ядерных взрывов предлагалось во многих областях, в том числе для форсирования добычи нефти и природного газа, для форсирования выхода геотермальной энергии и для добычи горючих сланцев. В итоговых документах Управления энергетических исследований и разработок специально выделено использование ядерных взрывов только для форсирования добычи природного газа [1]. Но пока еще идея осуществления большого количества подземных ядерных взрывов в качестве перспективного способа производства других видов энергии не получила признания.

Ниже подробно рассматриваются способы получения ядерной энергии в реакциях расщепления и синтеза. Будет показано, каким образом каждый из этих способов может стать практически неограниченным источником энергии. Наконец, будут рассмотрены различные сферы применения ядерной энергии, не считая производства электроэнергии.

Деление под действием тепловых нейтронов. В ближайшее время влияние ядерной энергии на топливо для транспортных средств выразится только в ее использовании для увеличения производства электроэнергии и в высвобождении тем самым нефти, из которой может быть получено топливо для транспорта. Согласно недавним прогнозам Управления энергетических исследований и разработок США [2] выработка электроэнергии на атомных электростанциях в стране возрастет с 9% в настоящее время до примерно 28% к 1985 г. Это составит около 10% энергии, производимой в стране. За счет ядерной энергии ежегодно будет высвобождаться 747 тыс. м³ нефти. Согласно тем же прогнозам, предполагается, что потребление энергии в США в течение указанного периода возрастет примерно на 35%. Естественно, что в течение этого периода ядерная энергия сможет облегчить положение, но не сможет полностью восполнить энергетический дефицит.

Однако при правильном регулировании, финансировании и при соответствующей подготовке общественного мнения за счет ядерной энергии можно будет удовлетворить большую часть потребностей США в электроэнергии. Электроэнергия в настоящее время производится примерно на 60 АЭС, а в течение ближайших 10—12 лет должно быть введено в строй дополнительно около 150 АЭС.

Примерно одна треть реакторов на АЭС являются реакторами, охлаждаемыми кипящей водой (BWR), а остальные две трети представляют собой реакторы, охлаждаемые водой под давлением (PWR).

В США имеется также один высокотемпературный реактор с газовым охлаждением (HTGR). Благодаря его способности работать при высокой температуре он может стать основным реактором для использования ядерной энергии в областях, отличных от производства электроэнергии.

Реакторы-размножители. Реакторы на тепловых нейтронах потребляют в основном изотоп урана U^{235} , содержание которого в нормальном уране составляет всего 0,71% по массе. Другой изотоп, U^{238} , используется в незначительных количествах. А в реакторах-размножителях благодаря превращению U^{238} в плутоний используется в качестве горючего весь уран. В реакторах-размножителях можно превратить торий в U^{233} , который также способен расщепляться. Таким образом, реакторы-размножители дают возможность создать комплексную систему, в которой реакторы взаимно обеспечивают друг друга горючим, причем уран и торий при этом используются полностью в отличие от реакторов на тепловых нейтронах, где используется только доля процента урана.

Следовательно, в качестве горючего можно будет пользоваться гранитом или водой океана, в которых обнаруживается ничтожная концентрация урана.

В этом случае ресурсы расщепляющихся материалов будут практически неограниченны.

Особое внимание исследователей привлекают два вида реакторов-размножителей: охлаждаемых жидким металлом (LMFBR) и газами (GCFR). Первому из этих реакторов правительство США уделяет особое внимание и надеется внедрить его в экономику страны до конца двадцатого столетия. Реакторы на быстрых нейтронах с газовым охлаждением в настоящее время усилению изучаются.

Роль реакторов на быстрых нейтронах в ядерно-энергетической экономике может быть показана путем рассмотрения трех этапов их развития: от 1970 до 1990 г., от 1990 до 2020 г., и после 2020 г.

Первый этап, представляющий реактор-конвертор на тепловых нейтронах, работающий на обогащенном горючем, представлен на рис. 1.

В результате действия большого количества реакторов с водяным охлаждением будут накапливаться запасы плутония.

Возрастет значение высокотемпературных реакторов с газовым охлаждением.

Ввод в строй реакторов-размножителей на быстрых нейтронах, работающих, как это видно из рис. 2, на плутонии, приведет к переходному этапу от экономики обогащенного горючего к экономике реакторов-размножителей. Ресурсы плутония, образующиеся в процессе эксплуатации реакторов с водяным охлаждением, дадут возможность быстрого внедрения реакторов на быстрых нейтронах. По мере увеличения доли реакторов на быстрых нейтронах будет получаться U^{233} для усовершенствованных реак-

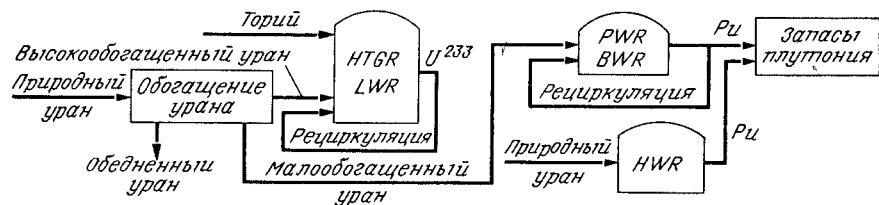


Рис 1 Ядерная экономика в 1970—1990 гг (HWR—реактор на тяжелой воде)

торов-конверторов на тепловых нейтронах, высокотемпературных реакторов с газовым охлаждением и, возможно, для реакторов-размножителей с водяным охлаждением. Потребность в обогащенном уране будет сокращаться по мере выхода из употребления реакторов с водяным охлаждением и в дальнейшем полностью исчезнет.

Как видно из рис. 3, после примерно 2020 г. может быть достигнут этап стабильного реактора-конвертора-размножителя на тепловых нейтронах, при котором реакторы-размножители с большим коэффициентом воспроизводства ядерного горючего и низким временем его удвоения будут обеспечивать создание плу-

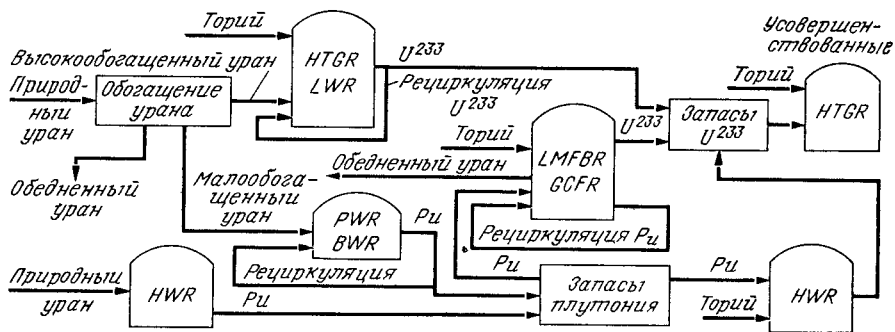


Рис. 2 Ядерная экономика в 1990—2020 гг. Переходная фаза от использования обогащенного горючего к реакторам-размножителям

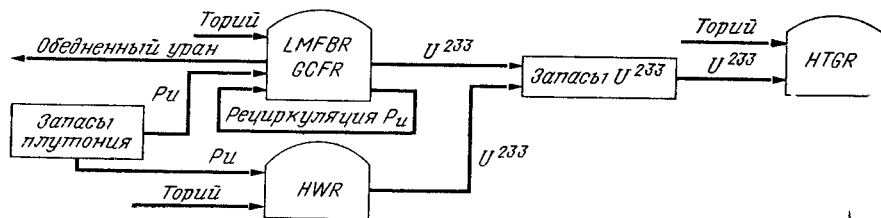


Рис 3 Ядерная экономика после 2020 г.

тониевого горючего для себя и для накопления энергии, а также топливо U^{233} для усовершенствованных конверторов на тепловых нейтронах. В этом случае отпадет потребность в обогащенном уране, поскольку можно будет воспользоваться энергетическим потенциалом всего урана и тория. Реакторы с газовым охлаждением обладают лучшими характеристиками с точки зрения выполнения роли реакторов-размножителей и усовершенствованных конверторов с большей мощностью на тепловых нейтронах.

Количество высокотемпературных реакторов с газовым охлаждением, которые могут обеспечивать топливом один реактор на быстрых нейтронах, зависит от коэффициентов воспроизводства (CR) высокотемпературного реактора с газовым охлаждением и реактора-размножителя на быстрых нейтронах. В такой комбинации более выгодны реакторы-размножители с газовым охлаждением. В комплексной экономической системе реакторов-размножителей, представленной на рис. 4, видно, что при комбинировании реактора-размножителя с газовым охлаждением на быстрых нейтронах (коэффициент воспроизводства 1,47) с тремя высокотемпературными реакторами с газовым охлаждением (коэффициент воспроизводства 0,87) система будет обеспечиваться топливом за счет работы одного реактора-размножителя на быстрых нейтронах (FBR).

Комплексы реакторов-размножителей и конверторов с самоподдерживающейся цепной реакцией могут эксплуатироваться таким образом, что некоторая часть расщепляемого материала, образующегося в реакторе-размножителе, не будет полностью расходоваться для пополнения потребностей установок, что позволит накапливать запасы мощностей.

Таким образом, достигается увеличение мощности системы путем уменьшения конверторов, которые обеспечивают горючим один реактор-размножитель.

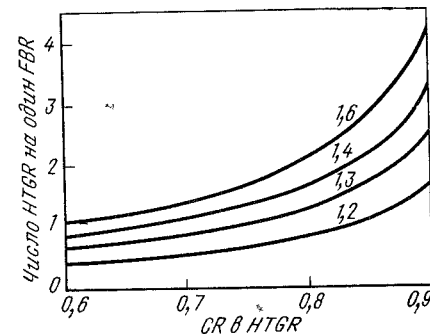


Рис 4 Комбинация HTGR и FBR в самоподдерживающейся равновесной системе. Цифры над кривыми — коэффициенты воспроизводства ядерного топлива в FBR

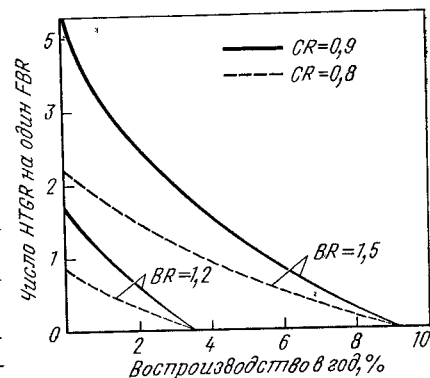


Рис 5 Ежегодные темпы роста гибридных систем при различных значениях коэффициента воспроизводства топлива в реакторах BR

На рис. 5 показано, что, в то время как размножители с низким коэффициентом воспроизводства ядерного горючего могут обеспечивать максимальный самоподдерживающийся прирост мощности, равный примерно 3,5%, в реакторах-размножителях (BR) с большим коэффициентом воспроизводства ядерного горючего этот прирост достигает 9% в год.

Из этого рисунка видно, что на ранней стадии быстрый рост реакторов-размножителей не может сам себя обеспечить горючим. Плутоний должен поступать из реактора с водяным охлаждением. Например, типичный реактор с водяным охлаждением может производить около 0,06 кг/год плутония на МВт (тепловой). Это обеспечит 10%-ный ежегодный прирост реакторов-размножителей, если использовать около половины мощности реакторов с водяным охлаждением, предназначенных для этой цели. При этом соблюдается условие, что на долю создаваемых реактором запасов приходится $\frac{1}{3}$ при характеристике реактора-размножителя 1 МВт/кг делящегося вещества (в активной зоне реактора). Следовательно, реакторы с водяным охлаждением в комплексе с высокотемпературными реакторами газового охлаждения обеспечат быстрое увеличение мощности последних.

Количество реакторов, которое может обеспечиваться горючим, зависит также от ядерной эффективности реакторов на тепловых нейтронах. Реакторы на тепловых нейтронах с высоким коэффициентом воспроизводства ядерного горючего (какими являются высокотемпературные реакторы с газовым охлаждением) могут удовлетворять свои потребности в значительной мере за счет собственных ресурсов. Реакторы-размножители с низким коэффициентом воспроизводства ядерного горючего не могут достичь самообеспеченности при высоких темпах роста мощностей по производству электроэнергии. При довольно высокой потребности в горючем для реакторов на тепловых нейтронах потребуется применение непрерывного дорогостоящего обогащения урана U^{235} . При меньших темпах роста можно прийти к самообеспеченности горючим после того, как будет достигнута необходимая пропорция между комплексными установками. Надлежащим соотношением комплексов установок считается такое, при котором избыток расщепляемого материала, образующегося в реакторах-размножителях, используется и в качестве дополнительного горючего для реакторов на тепловых нейтронах, и в качестве запаса горючего для новых реакторов на тепловых нейтронах и реакторов-размножителей в соответствии с предварительно установленными темпами роста. По мере улучшения ядерной характеристики реакторов и путем изменения темпов развития ядерной промышленности можно будет поддерживать общий баланс расщепляющегося вещества при небольших коэффициентах воспроизводства ядерного горючего и соотношения ядерных установок в комплексе. Пределы достижимых темпов роста и изменения соотношения установок в комплексе довольно

ограничены. Однако при высоких коэффициентах воспроизводства ядерного горючего расширяются пределы, при которых достижима самообеспеченность.

Термоядерная реакция. В процессе термоядерной реакции синтеза энергия выделяется во время соединения легких элементов с образованием более тяжелых и более стабильных элементов. Обычно считают, что единственной реакцией, осуществимой на установках, которые мы можем представить в настоящее время, является реакция дейтерий—третий. Дейтерий представляет собой тяжелый изотоп водорода H_2 , в то время как третий является еще более тяжелым изотопом водорода H_3 . В процессе синтеза из дейтерия и трития образуется гелий, при этом высвобождаются нейтрон и значительное количество энергии. Содержание дейтерия в обычном водороде (например, в воде) равно 0,015% по массе. Выделение дейтерия из воды дело довольно простое, и ресурсы дейтерия, таким образом, практически бесконечны. Тритий мало стабилен, его период полураспада равен 10,8 года. В природе он не обнаружен, но он может быть получен путем облучения нейтронами другого распространенного элемента — лития. Поэтому если разместить надлежащим образом литий вокруг термоядерного реактора так, чтобы использовались нейтроны, образующиеся в процессе реакции, то из лития выделится достаточное количество трития, необходимого для реакции синтеза.

Поисками путей научного осуществления контроля термоядерной реакции в США занимаются более дюжины субсидируемых правительством и частными компаниями лабораторий. Во всех этих лабораториях используется по крайней мере одна из следующих систем: тороидальная система, подобная Токамаку; открытое магнитное зеркало; импульсный тэта пинч-эффект; лазерный синтез.

Все эти системы связаны с решением проблем нагрева и регулирования плазмы. Их исследование дает ценную информацию относительно технологии и техники термоядерной реакции. В 1952 г в США была разработана первая программа, предназначенная для мирного использования термоядерной энергии. В соответствии с этой программой были созданы Перхепсетрон, Колумбус, линейный динамический пинч, Эстрон и другие системы для исследования плазмы.

К числу основных программ относятся пинч; стелларатор; магнитное зеркало.

В соответствии с программой «Шервуд» было также создано устройство Сцилла тэта пинч, в котором впервые достигнута температура плазмы выше уровня температуры начала реакции. Хотя это может показаться парадоксальным, возможно, наиболее важным открытием проекта «Шервуд» является то, что нет никаких препятствий, которые могли бы помешать в будущем достижению конечной цели — осуществлению контролируемой термоядерной реакции.

Таблица 1 Основные этапы освоения термоядерной энергии

Этап	Предполагаемая дата, год	Этап	Предполагаемая дата, год
Техническая осуществимость (Дублет III)	1978—1980	Экспериментальный энергетический реактор II	~1990
Опыт по горению, удвоение продолжительности горения (TFTR-TCT)	1980—1982	Демонстрационная энергетическая установка	~1995
Экспериментальный энергетический реактор I	~1985	Промышленные энергетические установки	>2000

Кроме того, большая полезная работа проделана субсидируемыми Управлением энергетических исследований и разработок Принстонской лабораторией физики плазмы и Лоуренской ливерморской лабораторией В течение последних двух лет впервые удалось доказать на принстонском адиабатическом тороидальном устройстве с магнитным удержанием плазмы Токамак возможность увеличения температуры плазмы с помощью пучка незаряженных частиц, а также путем компрессии В Лоуренсе создана крупнейшая в мире зеркальная машина 2XII

С 1952 г исследованием плазмы начала также заниматься Национальная лаборатория в Ок-Ридже, но интенсивные исследования в этой лаборатории проводят лишь с 1955 г В настоящее время на устройстве «Ормак» Национальной лаборатории в Ок-Ридже, которое представляет собой Токамак в измененном масштабе, проводится испытание нагрева с помощью пучка незаряженных частиц высокой мощности

Можно надеяться на то, что начатая в 1957 г в «Дженерал атомикс» программа будет одной из первых программ, которая позволит продемонстрировать образование плазмы требуемой температуры, плотности и продолжительности действия для достижения «равновесного состояния» Эта демонстрация была запланирована на 1978 г

В табл 1 приводятся основные вехи программы Управления энергетических исследований и разработок в области термоядерной реакции [1]

По всей вероятности в следующем веке, когда термоядерную реакцию будут практически использовать в качестве источника энергии в экономике, термоядерные реакторы так же, как и ядерные реакторы с расщепляющимся горючим, смогут использоваться для производства электроэнергии и получения технологического тепла Возможно, что термоядерные реакторы найдут и специальное применение для процессов синтеза, что сейчас нельзя предугадать

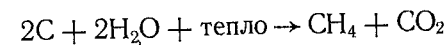
Топлива Большая часть первичной энергии для производства электроэнергии не используется.

Примерно 70% ее расходуется непосредственно для транспорта, получения технологического тепла в промышленности и в бытовом секторе. Поближе к концу века ядерная энергия, возможно, окажет значительное влияние на топлива для транспорта, поскольку она может быть использована для производства синтетических топлив Процессы производства синтетических топлив очень энергоемки. Ядерная энергия частично компенсирует потребности в этой энергии.

В настоящее время газификация угля по реакции водяной пар — углерод осуществляется с помощью тепла, образующегося при сжигании ископаемого топлива.

Процесс газификации угля по реакции водород—углерод [3] начинается с взаимодействия метана с водяным паром при температуре 650—870°C. Этот тепловой режим очень близок к тепловому режиму высокотемпературного реактора с газовым охлаждением.

Вторая ступень метода представляет реакцию между водородом и углеродом для получения метана. Суммарная реакция процесса может быть выражена схемой.



На рис. 6 показаны реактор и его активная зона, в которой может осуществляться процесс взаимодействия водорода и углерода. Через активную зону вниз движется гелий и подогревается до температуры 830 °C. Он проходит радиальные каналы и поднимается вверх по трубам реформера, где тепло передается смеси водяного пара с метаном Гелий затем проходит через находящиеся рядом генераторы пара, которым он отдает остаточное тепло. После этого гелий поступает в циркуляционную систему, в которой компримируется и вновь направляется в активную зону реактора.

По своим характеристикам высокотемпературный реактор с газовым охлаждением для производства технологического тепла во многом схож с высокотемпературным реактором для производства электроэнергии.

Одним из новых узлов в таком реакторе является реформер. Его конструкция значительно отличается от конструкции парогенераторов, однако информация относительно опыта эксплуатации и конструкции парогенераторов имеет важное значение для разработки реформера.

Тщательного исследования требуют вопросы объединения ядерной системы с химической технологической установкой. Необходимо определить эксплуатационные требования и разработать подходящие методы контроля, а также технику безопасности.

Крупный промышленный высокотемпературный реактор с газовым охлаждением, предназначенный в настоящее время для ис-

пользования в бытовом секторе, имеет проектную тепловую мощность 3000 МВт

Ниже приводятся типичные характеристики установки такой мощности по газификации угля, использующей высокотемпературный реактор с газовым охлаждением

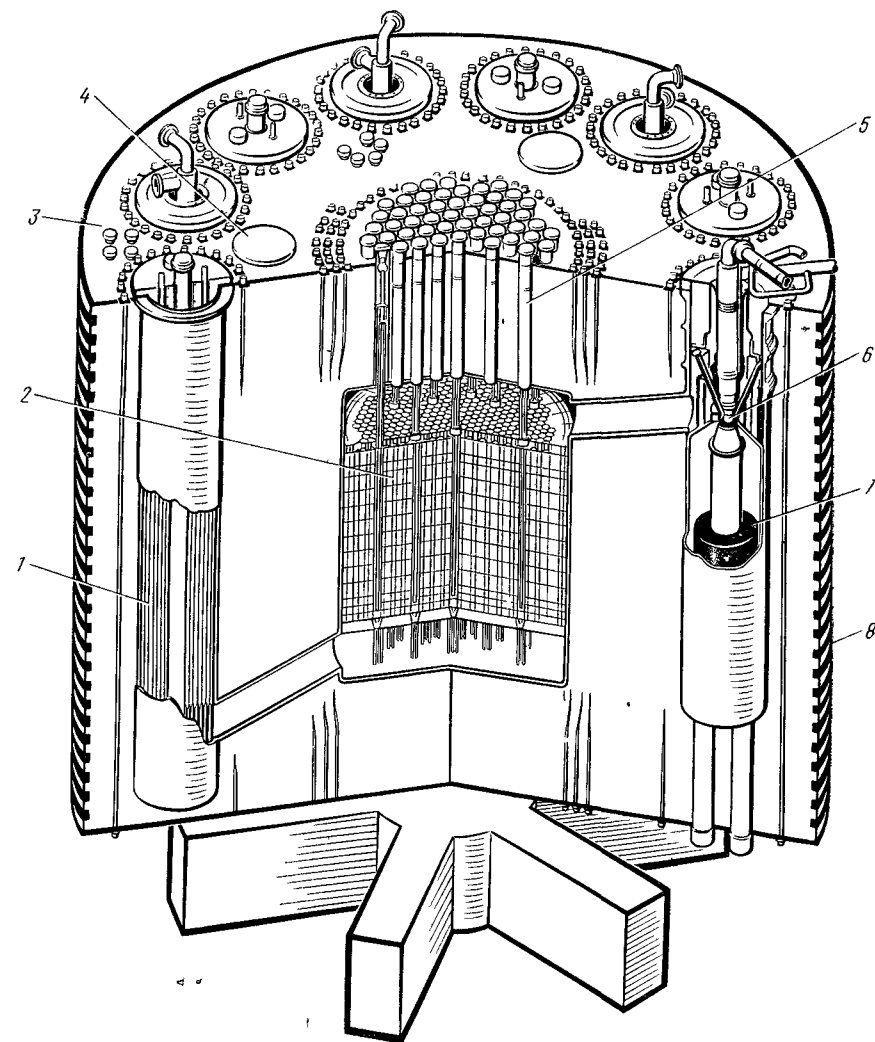


Рис 6 Высокотемпературный реактор с газовым охлаждением как источник тепла для химического процесса

1 — реформер, 2 — активная зона 3 — колодцы для очистки гелия 4 — вспомогательное охлаждение активной зоны, 5 — привод управления стержнем и стержни 6 — циркуляционный насос, 7 — парогенератор, 8 — корпус реактора из предварительно напряженного бетона

Выделение тепла в реакторе, МВт (тепловых)
Количество перерабатываемого угля, т/год
» получаемого газа, тыс м³/сут
Расход воды, м³/сут

3 000
12×10⁶
17 839
2 180

Технологическая схема процесса представлена на рис 7 Показан контур прохождения гелия в установке для газификации угля с целью получения водорода в качестве конечного продукта В тех случаях, когда будет требоваться водород высокой чистоты, эксплуатационный режим реформера может быть изменен в направлении снижения метана в конечном продукте Однако в таких процессах, как газификация угля и производство аммиака, не всегда требуется водород высокой чистоты

Сырьем для получения водорода могут служить природный газ, нефть или уголь

Парогенераторы высокотемпературного реактора с газовым охлаждением производят водяной пар, требующийся для газификации угля и для привода паровых турбин Даже в том случае, если на этой установке будет вырабатываться только водород, т е совершенно не будет вырабатываться электроэнергия, потребуется значительное количество энергии для сжижения водорода и для другого применения на установке

По мере сокращения использования угля или в силу экономических и (или) экологических соображений будет продиктовано сокращение его потребления, водород может стать важным топливом для транспортных средств В перспективе предвидится разработка эффективного и экономичного процесса производства водорода из воды с помощью ядерного тепла путем расщепления воды [4] Успех в области разработки этого процесса определит степень использования водорода и соединений водорода в качестве промежуточных источников энергии

В начале 60-х годов Министерство обороны США субсидировало исследования по использованию энергии ядерного реактора для разложения воды на водород и кислород Путем соединения водорода с азотом воздуха получают аммиак, который может быть использован в качестве автомобильного топлива Вода должна была разлагаться с помощью электролиза или в замкнутом термохимическом цикле В последнем случае не требовались крупные капиталовложения, а к п д оказывался

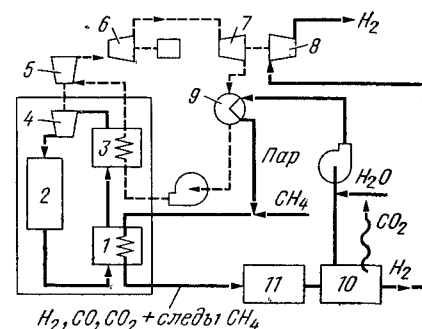


Рис 7 Технологическая схема установки газификации угля с высокотемпературным газовым реактором

1 — восстановитель 2 — активная зона реактора 3 — генератор пара 4 — гелиевый циркуляционный насос, 5 — паровая турбина 6 — турбогенератор, 7 — турбина 8 — водородный компрессор 9 — кипятильник у основания колонны 10 — сепаратор CO₂, 11 — конвертор CO

Таблица 2 Цикл реакций Испра Марк I термохимического разложения воды

Реакция	Температура, °C	Вид реакции
$\text{CaBr}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{HBr}$	730°C	Эндотермическая реакция
$2\text{HBr} + \text{Hg} \rightarrow \text{HgBr}_2 + \text{H}_2$	250°C	Экзотермическая реакция
$\text{HgBr}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaBr}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{HgO}$	100°C	То же
$\text{HgO} \rightarrow \text{Hg} + 1/2\text{O}_2$	590°C	»

более высоким, чем при электролизе. Однако эти исследования, прекращенные в 1964 г., не дали эффективного термохимического цикла.

Непосредственное термохимическое разложение воды под действием тепла происходит при такой высокой температуре, что практически процесс не технологичен. Но если воздействовать на воду некоторыми химическими реагентами в определенной последовательности, то температуру разложения воды можно значительно снизить. Тепло подводится для проведения отдельных этапов процесса, а химические реагенты воспроизводятся. Важным моментом в этом процессе является то, что температура, необходимая для проведения отдельных этапов процесса, значительно ниже температуры, требующейся при непосредственном термическом разложении воды. Температура проведения некоторых недавно предложенных циклов составляет всего 540—650 °C.

Обещающие результаты, полученные по программе расщепления воды в Лаборатории Евратома в Испре (Италия), вызвали новый интерес к термохимическим циклам. В последнее время были опубликованы сообщения о десятках подобных процессов. Пример одного из них, разработанного в Испре, показан в табл. 2, из которой видно как воспроизводятся химические реагенты.

С помощью ЭВМ была установлена возможность существования нескольких сотен подобных термохимических циклов. В настоящее время во всем мире проводятся исследования, направленные на решение проблемы поиска и промышленное внедрение эффективных циклов для разложения воды при сравнительно низких температурах.

Тепло, требующееся для проведения реакции, может быть получено с помощью ядерных реакторов. Очевидно, в ближайшем будущем технологически и экономически доступными способами можно будет получать практически неограниченное количество водорода для использования в качестве топлива. Если допустить, что экономические барьеры преодолены, наиболее значительным препятствием на пути решения этой проблемы являются время и усилия, требующиеся для создания ядерно-химической промышленности.

ОБСУЖДЕНИЕ

С Л. Мейсел (корпорация «Мобил рисерч энд дивелопмент»). Мы, безусловно, согласны с тем, что водород является отличным топливом. При его сжигании образуется только вода. Но где-то я читал, что наряду с водой получается некоторое количество и перекиси водорода. Не могли бы Вы осветить и этот вопрос?

П К. Т де Бёр (Корнельский университет). По нашему мнению, это не представляет никакой проблемы.

С. Грач («Форд мотор К°»). Какое количество энергии потребуется для сооружения этих 1350 реакторов?

Рассэлл. Примерно 1/10 от того количества, какое они выдают за время их эксплуатации.

Третья часть

БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА

Председатель заседания Дж. Б. ХЕЙВУД
Массачусетский технологический институт, Кембридж, штат Массачусетс, США

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЫЧНЫХ ТОПЛИВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ НЕНЕФТЯНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Р. У. ХАРН
Бартслвилл, штат Оклахома, США
Управление энергетических исследований и разработок

В статье приводятся экспериментальные данные, касающиеся физических и эксплуатационных свойств бензина, полученного из горючих сланцев, и бензина с компонентами, полученными из угля, дается краткое описание исходных для производства топлив материалов.

Как установлено при краткосрочной эксплуатации, в целом применение бензинов из горючих сланцев или из угля не влияет на загрязненность отработавших газов, характеристику двигателя и экономию топлива.

Для более точной оценки влияния на долговечность двигателя в условиях длительной эксплуатации требуются более полные испытания, а для таких испытаний, в свою очередь, требуется большее количество синтетического топлива.

Введение. Согласно современным прогнозам, начиная с середины 80-х годов непрерывно будет увеличиваться доля автомобильного топлива, получаемого из ненефтяных источников. Технология производства такого топлива пока полностью не разработана, но очевидно, что жидкие топлива из ненефтяных источников будут представлять собой очищенные продукты, получаемые либо в результате сухой перегонки горючих сланцев, либо путем гидрогенизации угля. Нефтяное сырье может использоваться для производства очищенных продуктов, применяемых отдельно, либо добавляться на нефтеперерабатывающих заводах к нефти для переработки смеси природной и синтетической нефти.

Продукты, получаемые из природной и синтетической нефти, трудноразличимы. Однако, несомненно, что переработка синтетической нефти или добавление ее к природной нефти вызовет необходимость в значительных изменениях технологических процессов. Кроме того, в связи с тем, что придется изменить технологию переработки, возможно, что при переработке синтетического сырья, получаемого из горючих сланцев или из угля, будут

вырабатываться продукты, с несколько отличающимися свойствами. Влияние на технологию переработки будет значительно важнее влияния на эксплуатацию такого топлива в двигателе. И, несмотря на это, характеристика топлив может оказывать большое влияние на двигатель и вспомогательное оборудование. Этому вопросу и посвящено настоящее исследование.

Первое исследование обычного топлива из ненефтяного сырья было проведено на бензинах, полученных из сланцевой смолы и из угля. Оба бензина получались по технологии и при параметрах технологического процесса, соответствующих производству синтетического топлива. Однако, возможно, что, в связи с отсутствием опыта оценки качества продуктов, выбор отдельных этапов технологических процессов не был оптимальным. В действительности, некоторые свойства получаемого топлива по современным критериям не соответствовали требуемому качеству. Поэтому не имеет смысла делать выводы относительно его качества по формальным показателям. Приводимые в настоящей работе результаты исследования имеют целью лишь показать особенности топлива из ненефтяного сырья и создать основу для их оценки.

Извлечение топлива. Сланцевая смесь, из которой вырабатывали бензин, получена из горючих сланцев месторождения Нэвел, Энвил-Поинтс, штат Колорадо. При непрерывной сухой перегонке в реторте примерно 15800 т горючих сланцев в течение 56 дней было получено около 1590 м³ сланцевой смолы. Ниже приводится сравнение свойств сланцевой смолы со свойствами природной нефти:

	Сланцевая смола	Природная нефть
Плотность, кг/л	0,9652	0,9659—0,8063
Содержание, % по массе:		
серы	0,065	0,04—4
азота	1,89	0,01—0,7

Для получения лигроина, легкого газойля, тяжелого котельного топлива, кокса и газа сланцевая смола направлялась на установку для фракционной перегонки. Для производства бензина из этих продуктов использовался лишь лигроин после его гидроочистки и риформинга.

Общее количество сырья для переработки составляло 1583 м³ сланцевой смолы, а выход продуктов составил 916 м³, в том числе, м³:

Бензина	115
Реактивного топлива JP-4	72
» » JP-5	103
Дизельного » № 2	186
Тяжелого котельного топлива	440

Таблица 1 Состав и свойства фракций синтетической нефти, полученной из угля штата Юта

Показатель	Синтетическая нефть	фракции синтетической нефти, выкипающие в пределах, °С		
		до 204	204—316	выше 316
Выход от синтетической нефти, % по объему	100,0	11,8	37,3	50,9
Упругость паров при 37,8°С, мм рт. ст	—	51	—	—
Плотность при 15,5°С, кг/л	0,9377	0,8388	0,8388	0,1096
Разгонка по ASTM, °С	D - 86	D - 86	D - 86	D - 1160
начало кипения	90,6	81,1	210,0	340,0
10% выкипает до	202,2	125,0	237,8	366,1
50% » »	335,0*	162,2	262,8	427,2
90% » »	—	192,8	297,8	513,3
конец кипения	—	210,0	318,9	—
Содержание, % по массе				
серы	0,07	0,12	0,03	0,02
азота	0,25	0,25	0,39	0,37

* При температуре выше 371°С наблюдалось разложение и перегонка прекращалась

Технология и результаты переработки сланцевой смолы подробно описаны в отчете Управления по исследованию и разработке энергетических и природных ресурсов военно-морского флота¹.

Бензин из угля был получен согласно процессу фирмы «Чар ойл энэрджи дивелопмент». В качестве сырья использован уголь штата Юта. Гидрогенизированная синтетическая нефть, полученная из угля, представляла собой малосернистую жидкость с плотностью 0,9377 кг/л. Путем ее перегонки были получены следующие топлива: прямогонный лигроин с температурой кипения 204°С (11,8% по объему от исходного сырья); прямогонный дистиллят, выкипающий в пределах 204—316°С (37,3%); остаток, кипящий при температуре выше 316°С (50,9%). В табл. 1 приводятся некоторые свойства полученных продуктов.

Тяжелая фракция (кипящая выше 316°С) подвергалась дальнейшей переработке на установке каталитического крекинга. В результате этого получали каталитический лигроин с концом кипения 204°С, легкий каталитический газойль, выкипающий в пределах температур 204—316°С. Каталитический лигроин смешивали с другими компонентами и получали бензин надлежащего фракционного состава с упругостью паров по Рейду 46,5 мм рт. ст. и октановым числом без добавки ТЭС — 96 (исследовательский метод).

Бензин, полученный из сланцевой смолы. Если говорить о физико-химических свойствах, то в целом по фракционному и углеводородному составу бензин, полученный из сланцевой

смолы, не отличается от многих применяемых в настоящее время бензинов.

Свойства бензина, полученного из сланцевой смолы

Плотность при 15,5°С, кг/л	0,6476
Разгонка по ASTM, °С:	
начало кипения	45,6
10% выкипает до	51,7
30% » »	70,0
50% » »	90,0
70% » »	127,2
90% » »	164,4
конец кипения	197,2
Упругость паров по Рейду, мм рт. ст.	544
Содержание, % по массе:	
серы	0,024
азота	0,03
кислорода	0,52
Типы углеводородов, % по объему:	
ароматические	28,0
олефиновые	14,0
насыщенные	58,0
Октановое число по:	
моторному методу	76,0
исследовательскому методу	81,1
Стабильность,	
индукционный период по методу ASTM, мин	1440
содержание фактических смол по ASTM, мг/100 мл	25
содержание смол при ускоренном окислении (4 ч), мг/100 мл	32

Однако по детонационной стойкости и стабильности он значительно уступает им. По этим показателям использование сланцевого бензина в качестве моторного топлива недопустимо. Для получения продукта, который можно было бы использовать, требуется дополнительная его очистка. Рассмотрение соответствующих технологических методов для доработки подобных продуктов выходит за рамки настоящего исследования.

В документе, упомянутом выше, контрактор военно-морского флота отметил, что «...эти топлива имеют тенденцию проявлять нестабильность при хранении, а также термическую нестабильность. Кроме того, в них содержится большое количество парафина, твердых частичек и смол. Можно полагать, что гидрогенизация под высоким давлением (14—15 МПа) и очистка отбеливающей землей позволит уменьшить или полностью устранить проблемы, связанные с этими примесями».

Что же касается моторных испытаний сланцевого бензина, то в связи с его низкой детонационной стойкостью (октановое число по моторному методу — 76, по исследовательскому методу — 81), высоким смолообразованием и плохой стабильностью вряд ли можно надеяться на то, что длительные испытания дадут положительный результат. Учитывая большие расходы, связанные с усовершенствованием любого процесса для повышения качества продукта, можно только предполагать, что и в данном случае без дополнительных расходов не обойтись. Однако нельзя идти

¹ Производство и очистка 1590 м³ сланцевой смолы для получения военных топлив

Таблица 2. Загрязнение окружающей атмосферы и топливная экономичность при работе на бензине, полученном из горючих сланцев

Топливо	Автомобиль	Загрязнение окружающей атмосферы, г/км пробега автомобиля				Топливная экономичность, км/л	
		СО	НС	NO _x	Альдегиды	Городское движение	Загородное движение
Бензин из горючих сланцев	Модель 1974 г	16,03	1,37	1,62	0,087	4,8	7,4
Индолен ¹	351-CID	16,10	1,43	1,68	0,093	4,6	7,5
Бензин из горючих сланцев	Модель 1977 г	4,60	0,81	1,68	0,112	5,2	9,0
Индолен ²	318-CID	5,41	0,75	1,56	0,106	5,2	8,8

¹ Индолен — эталонный нефтяной бензин.

² Данные, полученные на основании одного анализа. Во всех остальных случаях результаты соответствуют среднему из трех анализов.

на большие расходы без предварительного выявления требований, которые должны быть удовлетворены в процессе дополнительной очистки.

Результаты моторных испытаний. Несмотря на то, что сланцевый бензин непригоден для длительного применения в двигателе, была проведена работа с целью получения данных относительно содержания загрязнений окружающего воздуха в отработавших газах и топливной экономичности. Испытания проводились на автомобилях, оборудованных некаталитическими (термическими) дожигателями. Результаты испытаний приводятся в табл. 2.

Ни одно из отклонений не имело существенного значения. Единственной проблемой, с которой столкнулись при моторных испытаниях сланцевого бензина, являлась его низкая детонационная стойкость.

Бензин, полученный из угля. Легкий прямогонный лигроин, полученный при перегонке синтетической нефти из угля штата Юта, оказался чрезвычайно сложной жидкостью, в которой содержалось примерно 55% насыщенных, 14,5% олефиновых и 30,5% ароматических углеводородов. Содержание изопарафиновых и наftenовых углеводородов достигало 85% от насыщенных углеводородов. Эта жидкость отличалась высокой детонационной стойкостью и приемистостью к ТЭС:

Без ТЭС +0,5 мл +3,0 мл
ТЭС/кг ТЭС/кг

Октановое число по:			
исследовательскому методу	84,5	86,9	92,4
по моторному методу	78,1	79,8	83,6

Содержание серы (0,12% по массе) и азота (0,25%) в легком прямогонном лигроине было очень высоким, и для его использования требовалось понижение содержания этих примесей. По-

лучено было менее 8 л лигроина. Для дальнейшей очистки или компаундирования он не использовался.

Из продуктов, полученных в процессе переработки синтетической нефти из угля, наиболее пригодным материалом для использования в бензине был легкий каталитический лигроин, свойства которого приводятся ниже.

Свойства легкого лигроина каталитического крекинга

Упругость паров по Рейду, мм рт. ст.	239
Плотность при 15,5°C, кг/л	0,7865
Разгонка по ASTM, °C:	
начало кипения	45,0
10% выкипает до	72,2
30% » »	97,2
50% » »	122,8
70% » »	151,7
90% » »	182,2
конец кипения	205,6
Содержание, % по массе:	
серы	0,01
азота	0,057
Октановое число по исследовательскому методу:	
в чистом виде	94,8
с добавкой 0,5 мл ТЭС/кг	97,7
» » 3,0 » »	100,4
Октановое число по моторному методу:	
в чистом виде	84,0
с добавкой 0,5 мл ТЭС/кг	86,1
» » 3,0 » »	89,5
Выход:	
по отношению к сырью, подаваемому на установку каталитического крекинга, % по объему	38,1
по отношению к синтетической нефти, % по объему	19,4

Для получения бензина, который обычно требуется для автомобилей, легкий каталитический лигроин из угольной синтетической нефти смешивался с компонентами переработки нефти, показанными в табл. 3. Благодаря такому смешению получался бензин, хорошо сбалансированный по испаряемости и обладающий удовлетворительной детонационной стойкостью. Очень небольшое количество топлива, которое имелось в наличии, было использовано для проведения моторных испытаний, целью которых было выяснение топливной экономичности и сопоставление характеристик с эталонным нефтяным топливом (индоленом).

В результате этих испытаний не было установлено каких-либо значительных отличий в части содержания загрязнений в отработавших газах или в части экономичности между эталонным и испытуемым топливом. Только в отработавших газах при работе на топливе, содержащем компоненты угольного происхождения (табл. 4), отмечалось несколько повышенное содержание СО и НС. Повышенное содержание загрязнений в отработавших газах, по нашему мнению, отражает реальную разницу между синтетическим и эталонным (нефтяным) топливами. Это было установле-

Таблица 3 Свойства бензина с примесью продукта каталитического крекинга угольного происхождения и составляющих компонентов

Показатель	Бензио- вая смесь	Компонент			
		Бутан	Риформат	Алкилат	Лигроин каталитиче- ского крекинга с по- лупромышленной ус- тановки
Состав бензиновой смеси, % по объему	100	6	30	20	44
Плотность при 15,5°C, кг/л	0,7751	—	0,8236	0,9340	0,8063
Упругость паров, мм рт ст	472	3938	322	377	239
Содержание смол по ASTM, г/мл	—	—	1	2	4
Бромное число	14	—	1,2	1,2	30
Разгонка по ASTM, °C					
начало кипения	32,2	—	45,6	35,6	45,0
10% выкипает до	65,6	—	115,6	66,7	72,2
50% » »	127,8	—	151,7	101,7	122,8
90% » »	183,9	—	190,0	142,2	182,2
конец кипения	215,0	—	225,6	198,9	205,6
Октановое число по исследовательскому методу					
в чистом виде	95,6	—	96,5	93,5	94,8
с добавкой 0,5 мл ТЭС/кг	98,5	—	98,7	98,5	97,7
с добавкой 3,0 мл ТЭС/кг	102,6	—	101,3	103,6	100,4
Октановое число по моторному методу					
в чистом виде	86,2	—	86,9	91,1	84,0
с добавкой 0,5 мл ТЭС/кг	89,0	—	88,8	97,1	86,1
с добавкой 0,3 мл ТЭС/кг	93,2	—	92,0	101,4	89,5

Таблица 4 Загрязнение окружающей атмосферы и топливная экономичность при работе на бензине, содержащем компонент, получаемый из угля (модель автомобиля 1975 г., двигатель 318-CID)

Топливо	Загрязнение окружающей атмосферы, г/км пробега автомобиля				Топливная экономичность, км/л	
	CO	HC	NO _x	Альдегиды	Городское движение	Загородное движение
Бензин, полученный из угля	7,272	0,994	1,678	0,188	5,398	8,926
Индолен	5,407	0,746	1,554	0,106	5,271	8,756

но измерением содержания загрязнений в отработавших газах методом непрерывного замера и методом отдельных проб

Однако подобная разница может быть объяснена и небольшим различием в составе рабочей смеси Поэтому различия сами

по себе могут и не отражать влияния топлива на характеристику сгорания Во всяком случае различия настолько малы, что их абсолютные отклонения с помощью тех небольших количеств продукта, которые имелись в нашем распоряжении, не могут быть установлены

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможности исследования были весьма ограничены из-за небольшого количества топлива, полученного из угля, и непригодности для длительных моторных испытаний топлива, полученного из горючих сланцев Тем не менее, были сделаны некоторые полезные выводы

Кратковременные моторные испытания выдержали как бензин, полученный из сланцевой смолы, так и бензин, содержащий 44% компонента, полученного из угля Применение синтетического топлива не вызывает значительного изменения содержания загрязнений в отработавших газах, топливной экономичности или эксплуатационных свойств двигателя по сравнению с бензином, полученным из мидконтинентской нефти

Сланцевый бензин оказался непригодным для длительных моторных испытаний, однако этот недостаток, по видимому можно устранить путем соответствующего выбора или усовершенствования технологического процесса его получения

Лигроин, полученный в процессе каталитического крекинга (с выходом 51%) синтетической нефти из угля, оказался превосходным компонентом бензина При содержании в бензине 44% лигроина по объему (остальные компоненты 6% бутанов, 30% риформата и 20% алкилата) октановое число бензина по исследовательскому методу равно 96

Для определения требований к синтетическому топливу, характеризующих его пригодность для автомобильных двигателей, требуется проведение всесторонних длительных моторных испытаний Даже для проведения исследовательской фазы таких испытаний необходимо несколько кубометров топлива На всех этапах программы разработки синтетических топлив должно быть предусмотрено изготовление достаточного количества топлива для проведения испытаний

ОБСУЖДЕНИЕ

Ф. Б. Паркс (исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс») Я заметил, что содержание альдегидов в отработавших газах двигателя Вы определяли при работе на обоих синтетических топливах Ожидаете ли Вы более высокое содержание альдегидов в отработавших газах при работе на синтетических продуктах?

Харн Нет Мы определяем содержание альдегидов во всех испытываемых топливах Мы не только определяем содержание

альдегидов, но и содержание паранитроанилина в топливе наряду с его содержанием в отработавших газах. Определение содержания альдегидов производилось обычным способом. Определялось также содержание высших кислородных соединений.

С. С. Пеннер (Калифорнийский университет, Сан-Диего). Согласно Вашим данным, продукты, полученные из сланцевой смолы, отличаются высоким содержанием серы и азота. Можете ли Вы назвать примерную стоимость снижения их содержания?

Харн. Нет. Я даже не уверен, что кто-либо из нашей организации или любой другой организации пожелал бы ответить на этот вопрос. Успехи, достигнутые в разработке этого процесса, находятся в настолько ранней стадии, что делать такие оценки пока преждевременно.

С. Л. Мейсел (фирма «Мобил рисёрч энд дивелопмент»). Данные относительно распределения серы в Вашем продукте, полученном из угля, представляют значительный интерес. В легких фракциях содержание серы было высоким, а в тяжелых фракциях довольно низким. Типично ли это? Можете ли Вы это объяснить?

Харн. Я не могу объяснить этого. Для меня это так же интересно, как и для Вас. У меня нет никаких соображений относительно большего содержания серы в легких фракциях, но я пытаюсь найти ответ на этот вопрос. Мне неизвестно, является ли это случайностью или закономерностью.

В. Дж. Мак Лиан (Корнельский университет). Согласно Вашим данным, в топливе, полученном из угля, содержится больше азота, чем в топливе, полученном из сланцевой смолы. Наблюдалось ли то же самое в отработавших газах?

Харн. Мы пытались установить зависимость между содержанием окислов азота в отработавших газах и азота в исходном топливе, но нам это не удалось.

Дж. В. Хейвууд (Массачусетский технологический институт). Разрешите мне добавить к сказанному Вами. Согласно моим расчетам, содержание азота в этих бензинах довольно незначительно и обнаружить его влияние на содержание окислов азота в отработавших газах невозможно.

Б. В. Джозеф (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Хотелось бы знать, в каком виде азот присутствует в горючих сланцах?

Х. К. Хафмен (фирма «Юнион ойл компани оф Калифорния»). Соединения азота представляют в основном пиридины и хинолины.

Дж. П. Лонгуэлл (фирма «МИТ энд Эксон»). Я согласен с тем, что, если взять бензин синтетических нефтей, удовлетворяющий современным техническим требованиям, то трудно будет уловить в характеристике разницу между ним и бензином, полученным из нефти. Однако было бы интересно, например, в топливах, получаемых из угля, обратить внимание на высококипящие фракции, потому что в них могут содержаться ароматиче-

ские углеводороды, отличные от обычных ароматических углеводородов, встречающихся в нефтяных бензинах. В бензине, получаемом из угля, может оказаться больше полициклических ароматических углеводородов, присутствие которых способно вызывать такие проблемы, как образование отложений и повышение требований к октановому числу с течением времени, а также канцерогенность отработавших газов.

Харн. Мы вели поиск ответов на эти вопросы и работали в тесном сотрудничестве с Алексом Миллсом и сотрудниками, работающими в области исследования угля в Управлении энергетических исследований и разработок. Мне хотелось бы отметить еще одно обстоятельство. Бесспорно, мы никоим образом не стремимся производить бензины, точно соответствующие обычным бензинам. Мы считаем, что надо производить бензин из синтетических продуктов наиболее экономичным путем.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НОВЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА И ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

Дж. А. ХАРРИНГТОН

Компания «Форд мотор компани», Дирборн, штат Мичиган, США

Рассматриваются новый метод анализа и результаты, полученные с его помощью. Целью метода является исследование влияния рециркуляции отработавших газов на сгорание метанола в двигателях с искровым зажиганием. Метод исследования сгорания основан на измерении изменения логарифма произведения давления P на объем $V\gamma$ в зависимости от времени. Значение γ (отношение эффективных удельных теплоемкостей газов в зоне сгорания двигателя) легко определяется по наклону кривой $\log P$ в зависимости от $\log V$. Измерения $\log(PV\gamma)$ дают возможность упростить определение таких параметров, как задержки воспламенения, скорость сгорания и продолжительность горения.

Метод измерения $\log(PV\gamma)$ был применен для исследования влияния скорости рециркуляции отработавшего газа на характеристику продуктов сгорания одиоцилиндрового двигателя. Полученные результаты для метанола сравниваются с результатами, полученными при работе на бензине в одинаковых условиях эксплуатации двигателя и рециркуляции отработавших газов. При работе на метаноле меньше задержка воспламенения и продолжительность сгорания, чем при работе на бензине. При снижении нагрузки на двигатель (обеднение топливно-воздушной смеси и увеличение скорости рециркуляции отработавших газов) период задержки воспламенения сокращается на обоих топливах. С опережением зажигания периоды задержки воспламенения для них увеличиваются, а продолжительность горения сокращается. При одинаковых эквивалентных отношениях в рабочих смесях, массе воздуха, скорости опережения зажигания, и скоростях рециркуляции отработавших газов мощность двигателя при работе на метаноле примерно на 10% больше, чем при работе на бензине. В аналогичных условиях и при постоянной мощности объемный расход топлива при работе на метаноле примерно в 2 раза больше, чем при работе на бензине, а энергетический КПД выше. При значениях Φ_{FA}^* более

* Φ_{FA}^* — эквивалентное отношение (по массе) топливо—воздух в рабочей смеси

~1,05 содержание СО в отработавших газах при работе на метаноле ниже, чем при работе на бензине в таких же условиях. Содержание в отработавших газах NO при работе на метаноле в одинаковых условиях эксплуатации существенно ниже, чем при работе на бензине. Содержание в отработавших газах HC в сопоставимых условиях на метаноле обычно выше чем при работе на бензине. Пределы бедной смеси на всех исследованных скоростях рециркуляции отработавших газов на метаноле по сравнению с работой на бензине расширяются примерно на 0,10 эквивалентного отношения

Введение. Энергетический кризис стимулировал исследования в области производства и применения топлива из таких не нефтяных источников энергии, как уголь и горючие сланцы. Уголь, запасы которого имеются в изобилии, может обеспечить потребности в энергии на длительный период. В настоящее время из угля можно вырабатывать целый ряд синтетических топлив от спиртов (например, метанол), до топлив, очень напоминающих бензин [1]. Однако пока мы не в состоянии установить, какое из синтетических топлив является оптимальным. В связи с тем, что для налаживания производства и применения в двигателях новых видов топлива требуется много времени, преимущества и недостатки их должны быть установлены теперь. С точки зрения потребителя важное значение имеет оценка экономичности топлива, его технических характеристик, характеристики отработавших газов и процессов сгорания. Такая информация имеет первостепенное значение для создания оптимальной конструкции камеры сгорания или двигателей, предназначенных для эксплуатации на новом топливе.

Было проведено несколько исследований по применению новых топлив в двигателях внутреннего сгорания. В этих исследованиях основное внимание уделялось спиртам и бензо-спиртовым смесям [2—6], так как известно, что спирты могут вырабатываться для использования в качестве топлива и имеются в достаточных количествах для проведения испытаний. Из других топлив были исследованы аммиак [7] и смеси эфиров, воды или водорода с бензином или спиртами [8—11]. Во время таких исследований обычно изучается топливная экономичность, техническая характеристика и содержание загрязнений в отработавших газах. Однако для более полной оценки топлива необходимо исследовать фундаментальные характеристики его сгорания. Располагая сведениями относительно таких характеристик сгорания, как периоды задержки воспламенения (время образования ядра пламени) и периоды сгорания, наряду со сведениями о топливной экономичности, технической характеристике топлива и содержании загрязнений в отработавших газах можно определить взаимозависимости между этими параметрами.

Несмотря на то, что измерение основных параметров сгорания имеет важное значение для оценки топлива и двигателя, эти показатели редко определяются, потому что существующие методы их оценки очень сложны, а для обработки данных требуется проводить очень большие расчеты. Методы, наиболее часто используемые для исследования сгорания, основаны на измерении дав-

ления в цилиндре двигателя в процессе горения топлива или положения пламени в зависимости от времени [12—18]. Информация об изменении давления получается с помощью стандартных датчиков. Несколько труднее определять зависимость положения пламени от времени, поскольку в этом случае приходится модифицировать камеру сгорания таким образом, чтобы можно было воспользоваться датчиками концентрации ионов или сделать окна для фотографирования пламени. Эти измерения могут дать количественные результаты, но для того, чтобы на их основании оценить свойства рабочей смеси, период задержки воспламенения, скорость сгорания и интервалы горения, требуется произвести обстоятельные расчеты.

В настоящем докладе приводится описание нового метода анализа процесса горения и использования полученных результатов для оценки влияния рециркуляции отработавших газов на горение метанола в одноцилиндровом двигателе. В первой части работы приводится описание метода анализа. Метод основан на измерении логарифма произведения (давление) \times (объем) $^{\gamma}$, где γ представляет собой отношение эффективных удельных теплоемкостей газов в зоне сгорания. Преимущества таких измерений заключаются в том, что при этом можно пользоваться обычными знаниями процессов, происходящих в двигателе, и термодинамики. На рисунках показаны приборы, которыми приходилось пользоваться, а также приводится их характеристика. Во второй части работы дается описание экспериментальных результатов, полученных на одноцилиндровом двигателе при исследовании влияния скорости рециркуляции отработавших газов на характеристику содержания загрязнений в них при работе на метаноле. Результаты, полученные на метаноле при различных скоростях, нагрузках, регулировке периода зажигания и скоростях рециркуляции отработавших газов, сравнивались с результатами аналогичных испытаний, полученных при работе на бензине.

Метод анализа сгорания. В идеальном цикле Отто [19, 20] такты сжатия и расширения в цилиндре двигателя представляют адиабатные процессы. Сгорание и отвод тепла рассматриваются как процессы, происходящие при постоянном объеме соответственно в верхней и нижней мертвых точках. Работа реальных двигателей только приближается к такому циклу, но не связанные с горением такты сжатия и расширения почти адиабатны и математически могут быть представлены уравнением

$$PV^{\gamma} = C, \quad (1)$$

где P — абсолютное давление,

V — объем цилиндра,

γ — отношение эффективных удельных теплоемкостей газов в зоне сгорания,

C — константа для каждого, такого процесса.

В двигателе значения C или PV^{γ} для процессов сжатия и расширения примерно одинаковые. Однако в работающем дви-

гателе эти два процесса разделены существенно отличным от адиабатного процессом сгорания, который вызывает изменение значения $PV\bar{\gamma}$. В связи с увеличением давления при сгорании значение P после сгорания выше, чем перед ним. Изменение значений $PV\bar{\gamma}$, происходящее в процессе сгорания, представляет собой интерес для анализа, так как оно отражает детали процесса.

Теория. В этом разделе рассматриваются уравнения, показывающие изменение значений $PV\bar{\gamma}$ в зависимости от характеристик сгорания. На основании первого закона термодинамики анализ процесса сгорания в двигателях, изменение приращений массы топливно-воздушной смеси, сгорающей в течение определенного времени, могут быть выражены следующим образом:

$$dM_b = \frac{1}{E_c} \left| \frac{d(PV\bar{\gamma}) + PV\bar{\gamma} d(\ln \overline{MW})}{(\gamma - 1)(V\bar{\gamma}^{-1})} + dQ_{H.L} \right| \quad (2)$$

В этом уравнении E_c означает удельную массную теплотворную способность топлива; γ — отношение эффективных удельных теплоемкостей ($C_p(X, T)/C_v(X, T)$); \overline{MW} — молекулярная масса газов в зоне сгорания, а $dQ_{H.L}$ соответствует потерям тепла.

Отношение массы фракции сгорающей смеси в течение определенного времени

$$\left[\frac{M_b}{M_T} \right]_t = \frac{\int_{\text{начальная}}^t \left| \frac{d(PV\bar{\gamma}) + PV\bar{\gamma} d(\ln \overline{MW})}{(\gamma - 1)(V\bar{\gamma}^{-1})} + dQ_{H.L} \right|}{\int_{\text{начальная}}^{\text{конечная}} \left| \frac{d(PV\bar{\gamma}) + PV\bar{\gamma} d(\ln \overline{MW})}{(\gamma - 1)(V\bar{\gamma}^{-1})} + dQ_{H.L} \right|} \quad (3)$$

Если символ γ заменить символом $\bar{\gamma}$, то это будет означать, что тепловые потери включены в этот параметр. Если количественные значения параметров $V\bar{\gamma}^{-1}$, γ и $\ln(\overline{MW})$ принять за постоянные величины, то уравнение может быть проинтегрировано, после чего оно примет следующий вид:

$$\left[\frac{M_b}{M_T} \right]_t \cong \frac{(PV\bar{\gamma})_t - (PV\bar{\gamma})_{\text{начальный}}}{(PV\bar{\gamma})_{\text{конечный}} - (PV\bar{\gamma})_{\text{начальный}}} \quad (4)$$

Эта приближенная зависимость для массовой доли сгоревшей фракции очень похожа на зависимость, полученную Биззардом и Кекком [21] и примерно эквивалентна зависимости Рассвеллера и Висроу [12]. Несмотря на то, что точность этого уравнения снижена в связи с принятыми допущениями, его использование для получения характеристик, касающихся изменения давления от времени в зависимости от характеристик сгорания в двигателе, дает возможность получать ценную информацию о деталях горения.

Если высвободившееся при сгорании тепло выразить в виде энтропии (т.е. $dS_c = Q_c/T$), то можно получить альтернативную зависимость для массовой сгоревшей доли топлива за известное время. В этом случае приращение изменения сожженной в любое время массы выразится следующим уравнением:

$$d(M_b) = \frac{\bar{C}_v(X, T)(M_T)}{(dS_c/dM_b)} |d(\ln PV\bar{\gamma}) + d(\ln \overline{MW})| \quad (5)$$

где $C_v(X, T)$ — удельная теплоемкость при постоянном объеме газов;

M_T — общая масса горючей смеси,

dS_c/dM_b — дифференциальное приращение энтропии на единицу массы сгорающей смеси

Массная доля сгоревшей смеси в какой-то момент времени t может быть выражена следующим образом:

$$\left[\frac{M_b}{M_T} \right]_t = \frac{\int_{\text{начальная}}^t \frac{\bar{C}_v(X, T)}{dS_c/dM_b} |d(\ln PV\bar{\gamma}) + d(\ln \overline{MW})|}{\int_{\text{начальная}}^{\text{конечная}} \frac{\bar{C}_v(X, T)}{dS_c/dM_b} |d(\ln PV\bar{\gamma}) + d(\ln \overline{MW})|} \quad (6)$$

Если символ γ вновь заменить $\bar{\gamma}$, как в уравнении (4), и предположить, что значения $C_v(X, T)/(dS_c/dM_b)$ и $\ln(\overline{MW})$ величины постоянные, то после интегрирования уравнение (6) примет следующий вид:

$$\frac{M_b}{M_T} \cong \frac{\ln(PV\bar{\gamma})_t - \ln(PV\bar{\gamma})_{\text{начальный}}}{\ln(PV\bar{\gamma})_{\text{конечный}} - \ln(PV\bar{\gamma})_{\text{начальный}}} \quad (7)$$

Оба приведенных выше уравнения и уравнение (4) представляют собой приближенные зависимости, отражающие сгоревшую массную долю при определенных давлении и объеме. Общим недостатком для этих двух уравнений является то, что влияние теплопередачи должно быть компенсировано изменением значения γ (в виде $\bar{\gamma}$) и что значение $\bar{\gamma}$ должно быть принято за постоянную величину. Более серьезным допущением, общим для этих уравнений, является то, что горение рассматривается как простой процесс подвода тепла без изменения состава и учета влияния реальных газов. В уравнении (4) допущение о том, что $V\bar{\gamma}^{-1}$ величина постоянная, справедливо только для тех случаев, когда горение происходит очень близко от положения поршня к в.м.т. Допущение в уравнении (7) о том, что $C_v(X, T)/(dS_c/dM_b)$ величина постоянная, действительно только для специальных случаев.

Трудно сказать, какое из этих допущений является более важным, но полная детальная оценка такой зависимости выходит за пределы настоящего доклада. Эти зависимости были приведе-

ответствии со степенью сжатия. Общий сигнал, генерируемый детектором света, будет, следовательно, пропорционален объему камеры сгорания при любых данных углах поворота коленчатого вала и степени сжатия.

Во время определения «оптического» профиля кулачка было установлено, что подходящим для этой цели является радиальное смещение оси диска. При смещении диска от центра на расстояние ΔR движение края диска точно копирует движение поршня в двигателе (т.е. движение поршня под действием кривошипно-шатунного механизма). Расстояние ΔR определяется по формуле

$$\Delta R = \frac{R}{L} r_d, \quad (9)$$

где r_d — радиус диска; R/L — отношение радиуса угла поворота коленчатого вала к длине шатуна.

Сигнал, соответствующий логарифму объема, получается с помощью стандартной логарифмической цепи. Сигнал, соответствующий произведению γ и логарифма объема, получается затем путем умножения на логарифм сигнала объема. Логарифм $PV\gamma$ получается путем сложения сигналов $\log P$ и $\gamma \log V$.

Разработка нового метода для определения объема цилиндра двигателя на основании получения аналоговых сигналов дает возможность строить точные кривые зависимости давления P от объема V , $\log P$ от $\log V$ и $\log PV\gamma$ (или $PV\gamma$) от времени или угла поворота коленчатого вала. Кривые могут быть воспроизведены на электронном осциллографе и записаны на пленку или магнитную ленту для последующих расчетных операций. На рис. 3 показана блок-схема одной из компоновок прибора для демонстрации показаний на индикаторном устройстве электронного осциллографа. Ниже приводятся частотная характеристика механизма и полученные экспериментальные результаты.

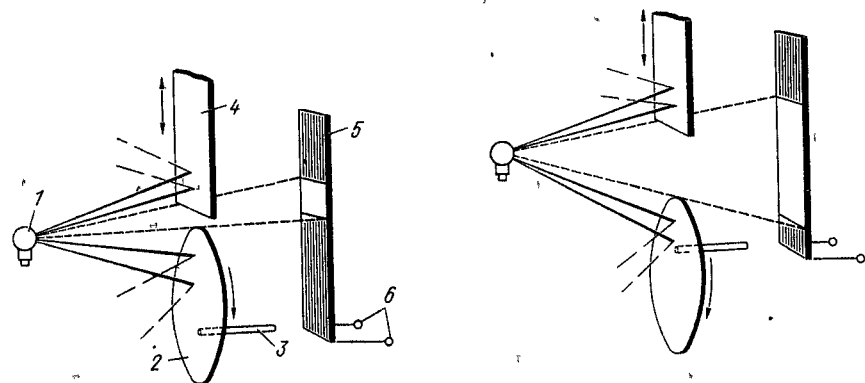


Рис. 2. Схема указателя объема камеры сгорания двигателя

1 — источник света, 2 — кулачок модуляции света, 3 — коленчатый вал двигателя, 4 — регулируемый ограничитель светового луча, 5 — детектор света, 6 — сигнал объема

Начальная проверка прибора заключалась в тарировке датчиков давления, устройства для измерения объема и соответствующей цепи. Во всех случаях сигнал был линейно отнесен к измеренному количеству.

Диаграммы зависимости между экспериментальным давлением, $\log P$ и $\log V$ получались после того, как соответствующие сигналы прибора использовались для вертикальных и горизонтальных разверток на электронном осциллографе во время работы двигателя. На рис. 4 и 5 показаны осциллограммы (индикаторные диаграммы) зависимостей

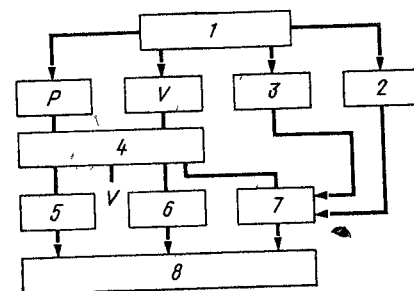


Рис. 3. Блок-диаграмма системы анализа сгорания

1 — двигатель, 2 — указатель угла поворота коленчатого вала, 3 — указатель регулировки зажигания, 4 — аналоговый электронный процессор, 5 — индикатор зависимости давления от времени, 6 — индикатор зависимости $\log P$ от $\log V$, 7 — индикатор зависимости $PV\gamma$ от времени, 8 — блок записи

P от V , полученные на двигателе Вокеша с переменной степенью сжатия при 1000 об/мин и давлении в коллекторе 750 мм рт. ст. Верхняя кривая зависимости P от V была получена в условиях работы двигателя от привода, а нижняя — на работающем двигателе (в качестве топлива использовался эталонный бензин — индолен). Опережение зажигания составляло 15° . Такие кривые полезны для анализа цикла двигателя при расчетах потребления топлива, процессов горения и т.д. На рис. 5 приведены логарифмические диаграммы, полученные при тех же условиях работы двигателя. Верхняя и нижняя осциллограммы сняты соответственно на двигателе с приводом и на работающем двигателе. Прямоугольный импульс в конце такта выпуска получается в результате повторной установки давления на нуль. Значения для тактов сжатия и расширения могут быть определены по наклону кривых. В показанном примере значение γ в конце такта сжатия было равно 1,29, а после сгорания в начале такта расширения — примерно 1,24.

На рис. 6 представлены экспериментально полученные зависимости $\log PV\gamma$ от времени (при γ , установленном на 1,265) для двигателя с внешним приводом и для работающего. Эксперимент проводился в условиях, аналогичных описанным выше. Указательные знаки на коленчатом валу через интервалы в 10° и указатель момента проскакивания искры на каждой кривой наложены друг на друга. Момент проскакивания искры на осциллограмме соответствует «ступени». Верхняя кривая характеризует «близкий к адиабатному» характер процессов сжатия и расширения в условиях работы от двигателя с внешним приводом. По ходу нижней кривой можно видеть, как процесс горения действует на $\log PV\gamma$. Значение $\log PV\gamma$ в момент воспламенения в работающем двигателе от искры соответствует значению

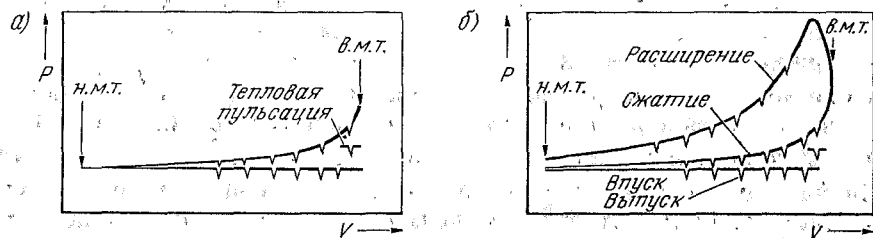


Рис. 4. Запись зависимости давления от объема:

а — двигатель с внешним приводом; б — работающий двигатель

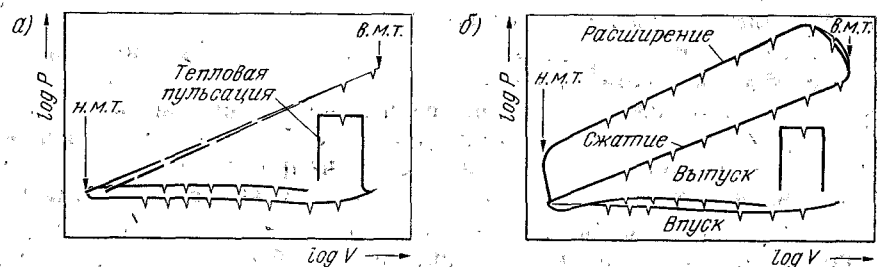


Рис. 5. Запись зависимости логарифма давления от логарифма объема:

а — двигатель с внешним приводом; б — работающий двигатель

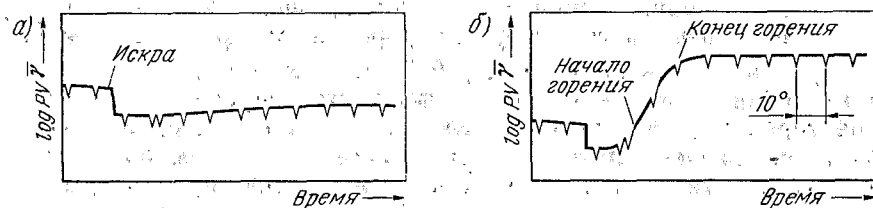


Рис. 6. Зависимость $\log(PV^{\gamma})$ от времени:

а — двигатель с внешним приводом; б — работающий двигатель (10° — градусы поворота коленчатого вала)

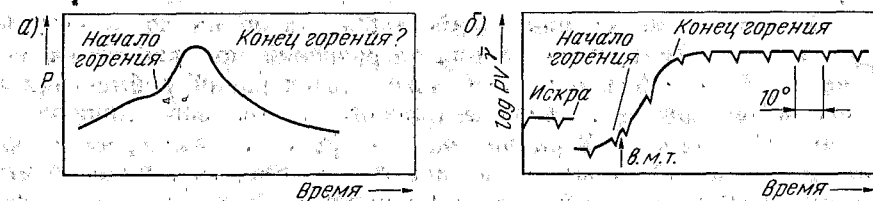


Рис. 7. Зависимость давления от времени и $\log(PV^{\gamma})$ от продолжительности сгорания:

а — зависимость давления от времени; б — зависимость $\log(PV^{\gamma})$ от времени (10° — градусы поворота коленчатого вала)

при работе двигателя с приводом. После небольшого периода задержки, в течение которого развивается ядро пламени (период задержки воспламенения обычно составляет порядка 2 мс), значение $\log PV^{\gamma}$ возрастает и приближается к более высокому уровню постоянной, при которой завершается горение. Мгновенный наклон кривой $\log PV^{\gamma}$ характеризует скорость сгорания. Вначале скорость сгорания невелика. С течением времени она возрастает, проходит через максимум, а затем снова падает до нуля, когда завершается горение. Измерения, производимые таким способом, позволяют значительно упростить определение задержки воспламенения, скоростей и интервалов горения. Такие измерения должны быть полезными при экспериментальной оценке и (или) испытании систем двигателя.

Преимущества определения показателя $\log PV^{\gamma}$ по сравнению с обычным измерением давления становятся очевидными при сравнении полученных экспериментальных данных в виде соответствующих кривых и объема работ, необходимых для определения параметров горения. На рис. 7, например, показаны кривая зависимости давления от времени и кривая зависимости $\log(PV^{\gamma})$ от времени. По первой кривой, однако, нельзя четко определить, когда начинается горение, как быстро оно нарастает и когда завершается. Получение такой информации связано с трудоемкими процессами точного определения изменения объема камеры сгорания и давления от времени, синхронизации этих данных с целью определения γ , а в последующем PV^{γ} или $\log PV^{\gamma}$ для всего временного интервала горения. В противоположность этому кривая зависимости $\log PV^{\gamma}$ от времени дает показатели в таком виде, что значительно упрощается определение параметров горения. Оценка характеристик скорости сгорания может быть произведена путем простого измерения наклона кривой; при этом легко могут быть определены точки, при которых начинается и завершается горение. Приводимые ниже данные относительно метода измерения $\log PV^{\gamma}$ были использованы для оценки влияния рециркуляции отработавших газов в одноцилиндровом двигателе на характеристику горения и содержание загрязнений в отработавших газах при работе на метаноле.

Влияние рециркуляции отработавших газов на характеристику горения и содержание в них загрязнений при работе на метаноле. Было проведено несколько исследований применения в качестве моторного топлива метилового и этилового спиртов — метанола и этанола. В ранних работах [2, 3] показано, что спирты могут использоваться в качестве моторного топлива и что их применение дает увеличение мощности, но вместе с тем снижает топливную экономичность. В работах [4, 5], в которых исследовалось и содержание загрязнений в отработавших газах, были подтверждены выводы предыдущих исследований и показано, что при работе на спиртах содержание загрязнений в

отработавших газах снижается. В последних исследованиях [6, 22] было получено хорошее совпадение с ранее опубликованными измерениями эксплуатационных характеристик, но в отношении содержания загрязнений в отработавших газах совпадение было неполным. В недавних исследованиях применения метанола, проведенных автором [6], было показано, что содержание в отработавших газах NO снижается, в то время как содержание HC и CO в сопоставимых условиях эксплуатации такое же или несколько большее, чем при работе на бензине. Было также показано, что метанол сгорает быстрее бензина. Ни в одном случае не изучалось влияние рециркуляции отработавших газов.

В данном исследовании на одноцилиндровом двигателе определялось и влияние рециркуляции отработавших газов на характеристики сгорания, содержание загрязнений в отработавших газах и эксплуатационные свойства метанола в сравнении с индолоном. Результаты, полученные на этих двух топливах, сравнивались при обычной частоте вращения двигателя, эквивалентном отношении компонентов рабочей смеси, опережении зажигания, рециркуляции отработавших газов и расходе воздуха.

Экспериментальное оборудование. Использовался двигатель Вокеша с переменной степенью сжатия, соединенный с динамометром мощностью 50 л.с. Цилиндрическая камера сгорания с плоской головкой была оборудована датчиками и кварцевыми окнами для наблюдения за процессом сгорания. Использовалась обычная система зажигания. Для измерения частоты вращения двигателя и опережения зажигания, а также температуры охлаждающей жидкости, смазочного масла и отработавших газов применялось стандартное оборудование. Крутящий момент двигателя измерялся с помощью динамометрического датчика, который был связан с балансирным тормозом. Воздух в двигатель подавался из системы с калиброванным регулируемым дросселем, встроенным в систему. Температура воздуха, поступающего в двигатель, контролировалась с помощью термомпары. Топливная система была рассчитана для работы на двух топливах. Она включала в себя топливный бак высокого давления из нержавеющей стали, дозирочные клапаны, тарированные расходомеры и модифицированный карбюратор. Топливо в трубку Вентури карбюратора вводилось не через систему главного жиклера, как обычно, а через капиллярную трубку диаметром 0,5 мм. Регулирование количества воздуха, поступающего в двигатель, осуществлялось путем изменения давления в топливной системе с игольчатым клапаном.

Образцы отработавших газов отбирались с помощью зонда из нержавеющей стали длиной 635 мм, по всей длине которого имелись впускные отверстия. Зонд размещался в выхлопной трубе так, чтобы направленный против потока конец находился на расстоянии 61 см от выпускного отверстия. Остальные элементы пробоотборной системы показаны на рис. 8. Для того чтобы избежать конденсации воды и, возможно, несгоревшего метанола,

а также обычной проблемы образования HC, пробоотборная трубка, идущая к анализатору HC, нагревалась до температуры примерно 190°C. Вблизи от анализатора HC пробоотборная трубка имела отвод для отбора CO, CO₂, NO и O₂, которые направлялись в свои анализаторы. Этот второй пробоотводный трубопровод содержал двухступенчатую холодильную ловушку, фильтр для задержания твердых частиц и осушитель, обеспечивавший полную осушку газов перед их впуском в анализатор. Измерение осушенных NO, CO и CO₂ осуществлялось с помощью недисперсионных инфракрасных анализаторов. Для анализа O₂

использовался полярографический анализатор. Анализы влажных HC, результаты которых затем пересчитывались на сухое вещество, производились детектором пламенной ионизации с использованием горячей части газовой пробы. Предполагалось, что чувствительность детектора к HC для обоих топлив была одинаковой¹, и поэтому сведения о концентрации метанола в отработавших газах соответствуют нижнему пределу значений.

Рециркулирующие отработавшие газы вводились непосредственно ниже дроссельной шайбы карбюратора со скоростью, которая определялась сравнением содержания CO₂ во всасывающей системе карбюратора и в отработавших газах. Система отбора проб и анализа, которая использовалась для измерения всасываемого CO₂, была подобна той, которая использовалась для измерения сухих отработавших газов. Для анализа небольших (0—5%) концентраций CO₂ использовался анализатор. Скорости поступления рециркулирующих газов (EGR) выражались в индексах (отношение концентраций CO₂ для сухих газов):

$$(EGR)_1^* = \frac{(CO_2)_{\text{впуск}}}{(CO_2)_{\text{выпуск}} - (CO_2)_{\text{впуск}}} \cdot 100. \quad (10)$$

Анализ сгорания производился с помощью ранее описанных в статье приборов. Сигналы анализаторов отражались на экра-

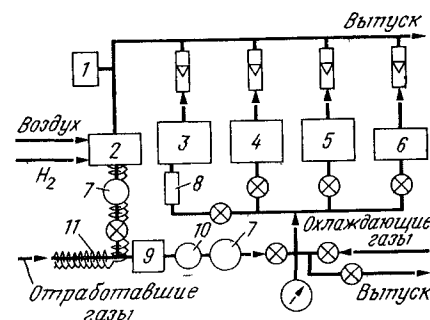


Рис 8 Структурная схема размещения измерительного оборудования

1 — датчик давления, 2 — детектор пламенной ионизации, 3 — индикатор NO, 4 — индикатор CO₂, 5 — индикатор CO, 6 — датчик O₂, 7 — насос, 8, 10 — фильтр, 9 — холодная ловушка, 11 — нагреваемый трубопровод

¹ Согласно литературным данным [23], чувствительность детектора пламенной ионизации по отношению к метанолу составляет примерно 50% от чувствительности к парафиновым углеводородам. Во время проведения испытаний не было приборов для определения относительного количества не полностью сгоревшего метанола и «нормальных» углеводородов.

* EGR₁ — показатель рециркуляции отработавших газов при работе на метаноле, %.

не осциллографа и записывались на полироидную пленку. Таким способом получались значения $\log(PV\tau)$ для десяти последовательных циклов двигателей, которые затем усреднялись для того, чтобы можно было по крайней мере частично учесть циклические изменения в процессе горения

Методика проведения эксперимента. Оценка сгорания, содержания загрязнений в отработавших газах и эксплуатационные свойства топлива определялись в двигателе, работающем в установленном режиме. В процессе испытания менялись расход топлива или опережение зажигания, а остальные параметры поддерживались постоянными. Условия проведения испытаний и характеристики двигателя приводятся ниже.

Параметры двигателя и условия эксплуатации

Рабочий объем двигателя, см ³	611,73
Степень сжатия	8,0
Температура масла, °С	48,9±2,8
» охлаждающей жидкости, °С	65,6±5,6
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	1,514
Температура поступающего воздуха, °С	37,8±1,7
Частота вращения вала двигателя, об/мин	600, 1000, 1500
Углы опережения зажигания, град	0, 15, 30, 45
Расход воздуха, кг/ч	От 4 до 15,9
Давление в коллекторе, мм рт. ст	483, 610, 711
Эквивалентное отношение горючее — воздух в рабочей смеси, Ф _{ФА}	От 1,2 до ~0,6
Индекс рециркуляции отработавших газов (EGR), %	От 0 до ~25

Для получения основных характеристик использовался индолен (эталонный бензин, изготовленный по спецификации федерального метода испытаний). Свойства этого топлива приводятся в табл. 1. При данном испытании двигатель работал от привода на определенной частоте вращения и при определенной подаче воздуха. Система зажигания была включена и зажигание регулировалось в соответствии с требованиями метода. Затем началась подача топлива, причем соблюдался определенный состав рабочей смеси. После достижения работы на установленном режиме производилась запись значений расхода топлива и воздуха, крутящего момента, содержания загрязнений в отработавших газах и характеристик сгорания для каждого топлива. Некоторые испытания для достижения определенной точности повторялись несколько раз.

Определенный состав рабочей смеси определялся с помощью компьютера на основе стехиометрии по отношению воздуха к топливу и измеренным расходом воздуха и топлива, а также на основании анализа содержания загрязнений в отработавших газах Ф_{ФА} представляет собой соотношение фактического и теоретического количества горючего и воздуха в рабочей смеси, при котором весь кислород воздуха окисляет все топливо. Получение значений Ф_{ФА} основывалось на анализе отработавших газов после работы двигателя на метаноле, а существующая компьютерная программа для углеводородных топлив была видоизменена с

Таблица 1. Свойства индолена и метанола

Показатель	Индолен	Метанол
Отношения водород/углерод, кислород/углерод	1,87, 0	4,1, 1,0
Плотность при 15,6°С, кг/л	0,743	0,796
Отношение массы воздуха, необходимого для сгорания, к массе топлива (в нормальной смеси)	14,6	6,46
Октановое число по исследовательскому методу	96,8	106
моторному методу	88,2	92,0
Содержание свинца, г/л	0,00449	0
Температура кипения, при нормальном давлении, °С	Топливо, выкипающее в широком интервале температур	64 4
Теплота сгорания, ккал/кг	10 556	477,3
Скрытая теплота испарения при 25°С, ккал/кг	Топливо, выкипающее в широком интервале температур	262,8
Углеводородный состав, % по объему		
ароматические углеводороды	32,8	—
олефины	2,7	—
парафиновые углеводороды	64,5	—
Фракционный состав, °С		
начало кипения	31,1	—
10% выкипает до	48,3	—
30% » »	77,2	—
50% » »	100,6	—
70% » »	115,0	—
90% » »	148,3	—
конец кипения	197,2	—

целью возможности ее использования для любого С—Н—О топлива. Вводными данными для программы служили измеренные концентрации CO, CO₂, O₂, HC и NO в отработавших газах, а также атомные отношения H/C и O/C в топливе

Характеристики сгорания и мощностная характеристика. Характеристики сгорания и снимаемая мощность, полученная при работе двигателя на индолене и метаноле, представлены на рис 9—16. На каждом из этих рисунков, состоящем из трех снимков, показаны соответственно периоды задержки воспламенения (при сгорании от 0 до 5%) и горения (при сгорании от 5 до 95%), а также крутящий момент двигателя в зависимости от состава рабочей смеси.

Влияние состава рабочей смеси и рециркуляции отработавших газов на эти характеристики представлены на рис 9, а, б. С обеднением смеси и рециркуляцией отработавших газов периоды задержки воспламенения для обоих топлив возрастают. Периоды задержки воспламенения метанола при обычных значениях Ф_{ФА} и EGR₁ короче на 10—25% периодов задержки воспламенения при работе на индолене. Самая большая разница в периодах задержки воспламенения наблюдается при более низких уровнях рециркуляции отработавших газов. Интервалы горения при рабо-

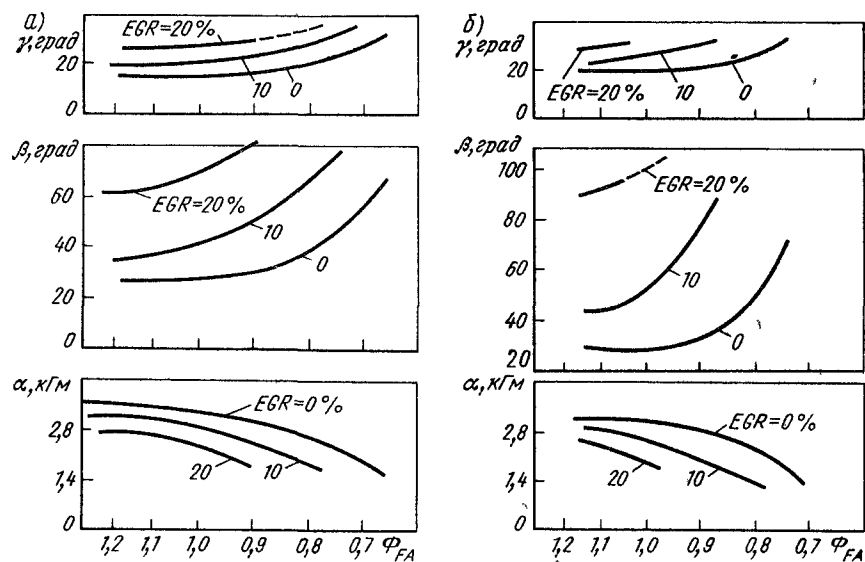


Рис 9 Влияние Φ_{FA} и рециркуляции отработавших газов (EGR) на работу двигателя (топливо—метанол (а) и индолен (б), опережение зажигания—15°, частота вращения вала двигателя—100 об/мин, давление—700 мм рт ст)
 α — индикаторный крутящий момент, кгм, β — интервалы сгорания, град;
 γ — задержка воспламенения, град

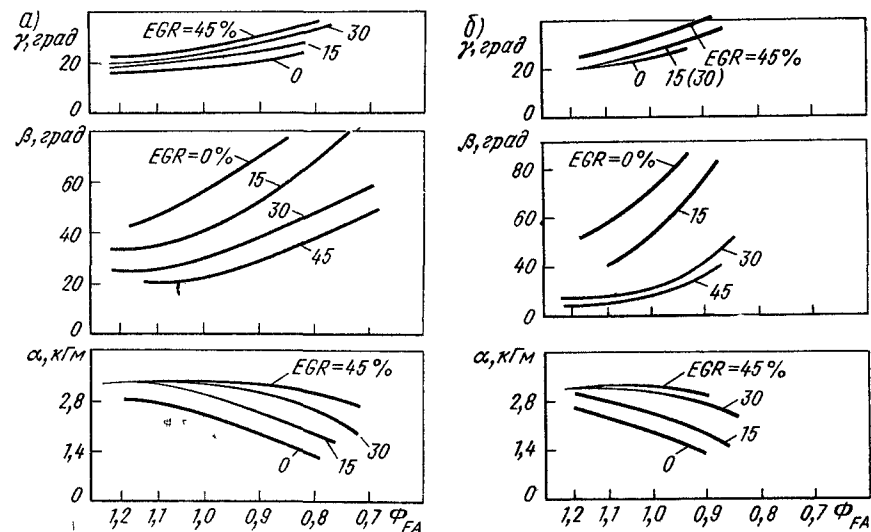


Рис 10 Влияние Φ_{FA} и опережения зажигания на работу двигателя (топливо—метанол (а) и индолен (б), примерно 10%-ная рециркуляция отработавших газов, частота вращения вала двигателя—1000 об/мин, давление—700 мм рт ст)

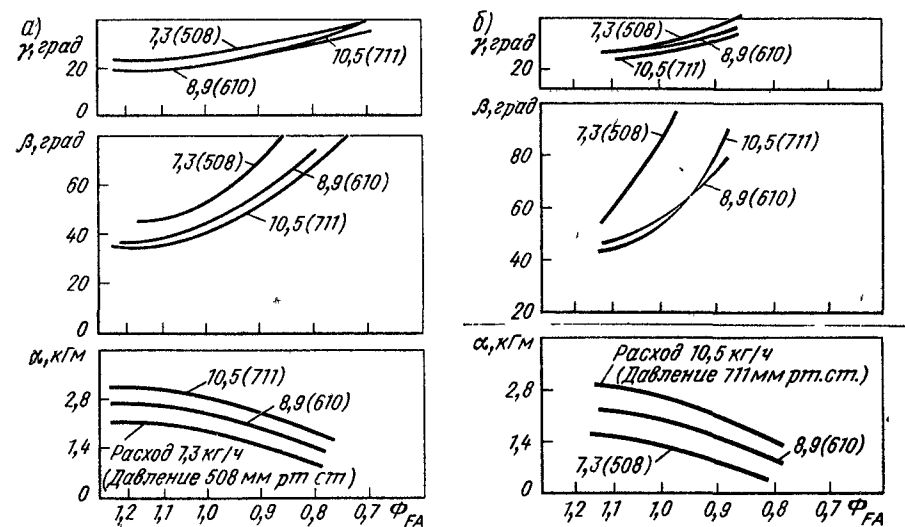


Рис 11 Влияние Φ_{FA} и расхода воздуха на работу двигателя (топливо—метанол (а) и индолен (б), опережение зажигания—15°, примерно 10%-ная рециркуляция отработавших газов, частота вращения вала двигателя—1000 об/мин)

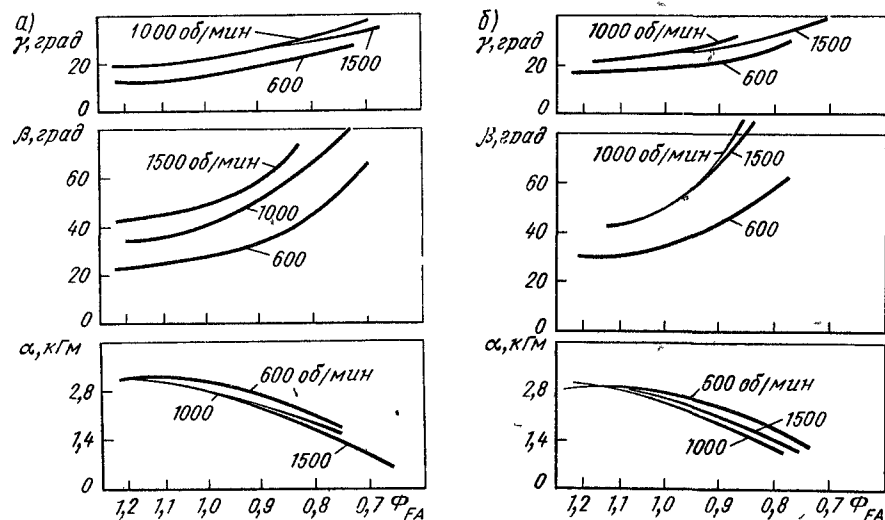


Рис 12 Влияние Φ_{FA} и частоты вращения вала на работу двигателя (топливо—метанол (а) и индолен (б), опережение зажигания—15°, давление—700 мм рт ст, примерно 10%-ная рециркуляция отработавших газов)

те на метаноле короче, чем интервалы горения на индолене при всех обычных величинах расхода рециркулирующих отработавших газов и Φ_{FA} . Без рециркуляции отработавших газов периоды сгорания метанола на 8—20% короче, а при показателе EGR, равном примерно 18%, они короче почти на 50%. С обеднением и увеличением расхода рециркулирующих отработавших газов падает снимаемая мощность на обоих топливах. При работе на метаноле без рециркуляции отработавших газов мощность на 10% больше, чем при работе на индолене. При показателе $EGR_1 = 18\%$ мощность при работе на метаноле на 25% больше.

На рис. 10, а, б показано влияние опережения зажигания и состава рабочей смеси. Период задержки воспламенения по мере приближения к в. м. т. увеличивается, в то время как период горения сокращается. Такая же тенденция наблюдалась при изменении параметров горения в зависимости от опережения зажигания на всех исследованных уровнях рециркуляции отработавших газов. Из сравнения результатов для двух топлив при показателях $EGR = 10\%$ видно, что при работе на метаноле периоды задержки воспламенения и сгорания на 19—26% короче, чем на индолене. При других уровнях рециркуляции отработавших газов периоды задержки воспламенения и горения при работе на метаноле на 10—50% короче, чем на индолене. Наибольшие различия получаются при более высоких уровнях рециркуляции отработавших газов. Влияние изменения опережения зажигания, на мощность двигателя при различных значениях Φ_{FA} и рециркуляции отработавших газов для метанола и бензина аналогично. Снимаемая мощность на всех проверенных опережениях зажигания на метаноле была выше, чем при работе на индолене. При угле опережения зажигания 45° (EGR_1 примерно 10%) на метаноле мощность была на 5% больше, а при угле опережения зажигания 0° — на 20% больше. То обстоятельство, что снимаемая мощность на обоих топливах по мере изменения угла опережения зажигания с 0° до 45° непрерывно растет, свидетельствует о том, что при оптимальном крутящем моменте и данном уровне рециркуляции отработавших газов оптимальный угол опережения зажигания превышает 45° . При нулевой рециркуляции отработавших газов и оптимальном крутящем моменте оптимальный угол опережения зажигания на метаноле на 2—5° меньше, чем на индолене.

Влияние состава смеси и установки дроссельной заслонки (массного расхода воздуха) на характеристику сгорания показано на рис. 11, а, б. По мере увеличения нагрузки и обеднения смеси периоды задержки воспламенения для обоих топлив снижаются. При работе на метаноле они на 15—30% короче, чем на индолене. Периоды горения на обоих топливах по мере увеличения расхода также имеют тенденцию к снижению. Из сравнения этих результатов можно видеть, что периоды горения при работе на метаноле примерно на 25—50% короче, чем на индолене. Самая большая разница в проведенных исследованиях

имела место при наименьших нагрузках и наиболее бедных смесях. Аналогичные тенденции наблюдались и при других уровнях рециркуляции отработавших газов. При нулевом уровне рециркуляции отработавших газов период сгорания метанола на 8—30% короче, чем индолене. Как и ожидалось, с увеличением расхода воздуха возрастала и снимаемая мощность на обоих топливах. При EGR_1 , равном примерно 10%, и расходе воздуха 10,5 кг/ч на метаноле мощность была на 10—30% выше, чем на индолене. При расходе воздуха 7,26 кг/ч мощность на метаноле выше на 5—200%.

На рис. 12, а, б показано влияние частоты вращения двигателя на характеристику сгорания и мощность двигателя. С целью сравнения использовались результаты, полученные при угле опережения зажигания 15° , значении EGR_1 , равном примерно 10%, и постоянном массовом расходе воздуха за цикл (приблизительно $0,349 \times 10^{-3}$ кг/цикл). С увеличением частоты вращения двигателя задержка воспламенения для обоих топлив имеет тенденцию к увеличению. Довольно значительное увеличение периода задержки воспламенения происходит при изменении частоты вращения двигателя с 600 до 1000 об/мин. В диапазоне же 1000—1500 об/мин задержка воспламенения оставалась на одном и том же уровне. Период задержки воспламенения при работе на метаноле на всех частотах вращения меньше, чем при работе на индолене. Период задержки воспламенения при работе на метаноле и 600 об/мин примерно на 30% меньше, а при 1000 и

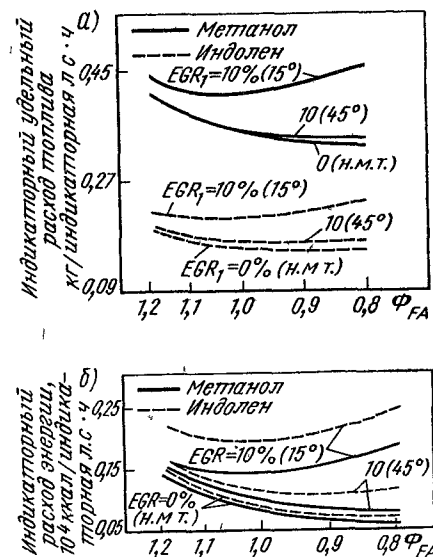


Рис. 13. Влияние Φ_{FA} и опережения зажигания на расход топлива (а) и индикаторной удельной энергии (б) (частота вращения вала — 1000 об/мин, крутящий момент — 2,35 кгм)

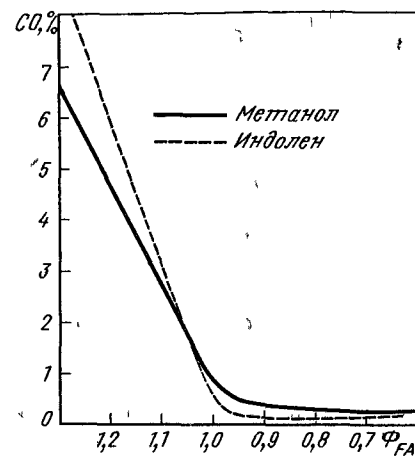


Рис. 14. Влияние Φ_{FA} на содержание CO в отработавших газах (частота вращения вала — 1000 об/мин, расход воздуха — 11,8 кг/ч, зажигание — 15°)

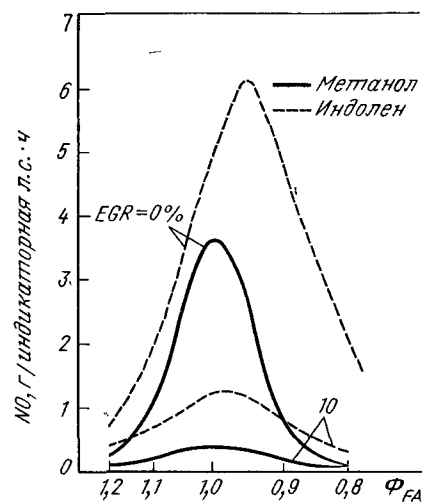


Рис. 15. Влияние $\Phi_{ФА}$ и рециркуляции отработавших газов на индикаторное удельное содержание СО в отработавших газах (частота вращения вала — 1000 об/мин, крутящий момент — 2,35 кгм, зажигание — 15°)

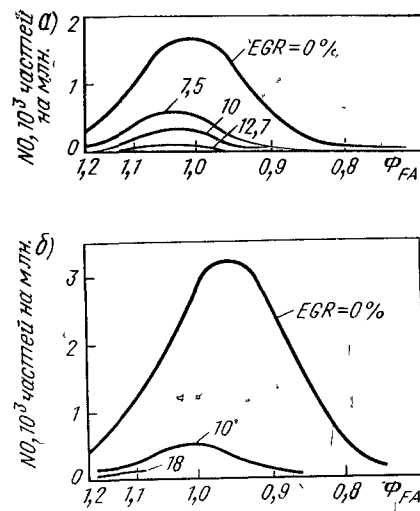


Рис. 16. Влияние $\Phi_{ФА}$ и расхода воздуха на содержание NO в отработавших газах. Топливо — метанол (а) и индолен (б)

1500 об/мин на 12% меньше, чем на индолене. Влияние частоты вращения двигателя на период сгорания для каждого из этих топлив несколько отличается. При увеличении частоты вращения двигателя с 600 до 1000 об/мин периоды сгорания для обоих топлив увеличиваются, при этом на метаноле период сгорания примерно на 28% короче. Однако с увеличением частоты вращения двигателя с 1000 до 1500 об/мин на индолене период сгорания не изменяется, в то время как на метаноле продолжает увеличиваться. В связи с этим при 1500 об/мин период сгорания на метаноле равен периоду сгорания для индолене в условиях работы на богатой смеси и примерно на 16% короче при работе на бедной смеси. Тем не менее, несмотря на то, что относительный интервал сгорания изменяется, при работе на метаноле он снижается быстрее, чем при работе на индолене.

Расход топлива. На рис. 13, а, б приводится характеристика обоих топлив в виде зависимости их индикаторного удельного расхода (кг/и. л. с. ч) и индикаторного удельного расхода их энергии (ккал/и. л. с. ч) от $\Phi_{ФА}$. Как видно из рисунка, расход топлива при работе на метаноле для каждого значения $\Phi_{ФА}$, опережения зажигания и рециркуляции отработавших газов примерно в 2 раза больше, чем при работе на индолене (см. рис. 13, а). Однако соответствующий расход индикаторной удельной энергии при работе на метаноле такой же или ниже, чем при работе на индолене (см. рис. 13, б). При угле опережения зажигания 15° и при EGR_1 , равном

10, расход энергии на метаноле на 12—15% меньше. При угле опережения зажигания 45° и при EGR_1 , равном 10, расход энергии на метаноле ниже от 3% при $\Phi_{ФА} = 1,2$ до 10% при $\Phi_{ФА} = 0,8$.

Характеристика содержания загрязнений в отработавших газах.

Концентрации СО в отработавших газах при работе двигателя на метаноле показаны на рис. 14. Так же как и при работе на бензине, концентрация СО на метаноле является лишь функцией $\Phi_{ФА}$ и не зависит от частоты вращения двигателя, расхода воздуха, рециркуляции отработавших газов и установки опережения зажигания. При смесях богаче, чем $\Phi_{ФА} = 1,05$, концентрации СО при работе на метаноле ниже, чем на индолене. Однако на более бедных воздушно-топливных смесях они выше почти в 2 раза. На рис. 15 приводится индикаторное удельное содержание СО в отработавших газах. Относительное индикаторное удельное содержание СО в отработавших газах для обоих топлив при обычных EGR_1 и $\Phi_{ФА}$ соответствует значениям, определенным на основе фактических концентраций.

На содержание NO в отработавших газах обоих топлив оказывают влияние $\Phi_{ФА}$, расход воздуха (установка дросселя), рециркуляция отработавших газов, частота вращения двигателя и опережение зажигания так же, как и при работе на бензине. На рис. 16, а, б показано влияние $\Phi_{ФА}$ и рециркуляции отработавших газов на концентрацию NO. На уровень содержания NO в отработавших газах обоих топлив в одинаковой

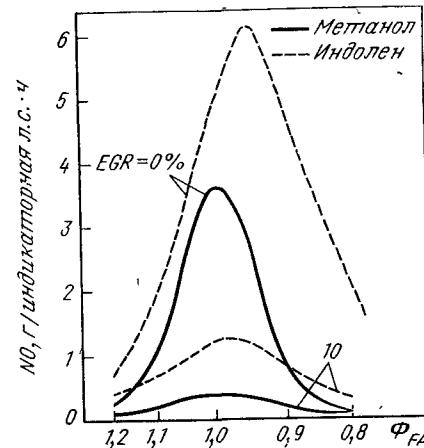


Рис. 17. Влияние $\Phi_{ФА}$ и рециркуляции отработавших газов на индикаторное удельное содержание NO в отработавших газах (частота вращения вала — 1000 об/мин, крутящий момент — 2,35 кгм, зажигание — 15°)

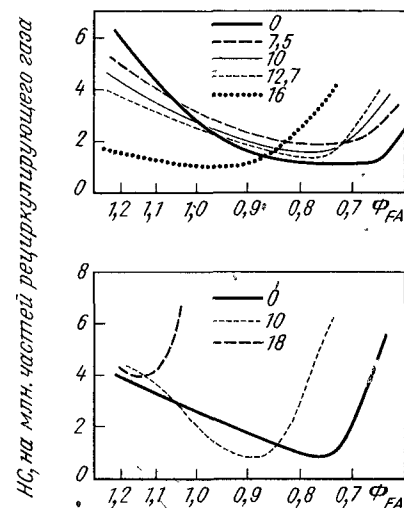


Рис. 18. Влияние $\Phi_{ФА}$ и рециркуляции отработавших газов на содержание в них HC (определено «мокрым» способом)

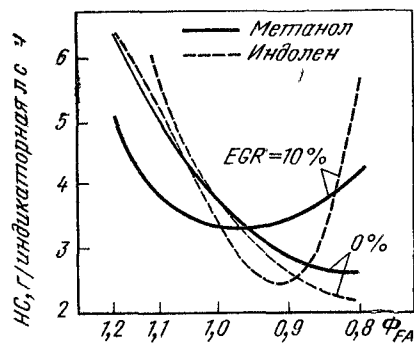


Рис 19 Влияние $\Phi_{\text{ФА}}$ и рециркуляции отработавших газов на индикаторное удельное содержание в них НС (частота вращения вала — 1000 об/мин, крутящий момент — 2,35 кгм, зажигание — 15°)

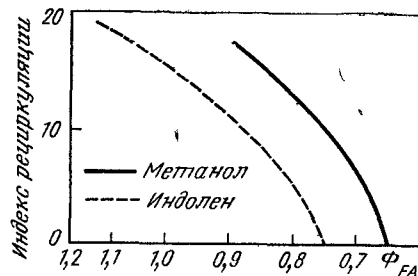


Рис 20 Взаимозависимость $\Phi_{\text{ФА}}$ и рециркуляции отработавших газов при эксплуатационных условиях (частота вращения вала — 1000 об/мин, зажигание — 15° , расход воздуха — 10,5 кг/ч)

зах при работе на метаноле в 3—4 раза меньше, чем при работе на индолене

Содержание в отработавших газах НС (на основании определения концентраций) в зависимости от частоты вращения двигателя, расхода воздуха, $\Phi_{\text{ФА}}$ и опережения зажигания при работе на обоих топливах изменяется аналогично тому, как и при работе на бензине¹. При работе на индолене с рециркуляцией отработавших газов содержание НС изменялось, как и предполагалось, однако на метаноле наблюдалось некоторое отклонение по сравнению с «нормальным бензином». Результаты этих испы-

степени влияют EGR_1 и $\Phi_{\text{ФА}}$. Концентрации NO при работе на метаноле для любых значений $\Phi_{\text{ФА}}$, расхода воздуха, EGR_1 , частоты вращения двигателя и установок опережения зажигания, как правило, ниже, чем при работе на индолене. Самая большая разница в концентрации NO для топлива при работе на бедной смеси без рециркуляции отработавших газов. На рис 17 показано изменение индикаторного

удельного содержания NO в отработавших газах в зависимости от $\Phi_{\text{ФА}}$. При обычных значениях $\Phi_{\text{ФА}}$ и EGR_1 индикаторное удельное содержание NO в отработавших газах меньше на метаноле. При работе на богатой смеси ($\Phi_{\text{ФА}}$ более 1,05) без рециркуляции отработавших газов значения индикаторного удельного содержания NO при работе на метаноле до 2 раз больше, чем на индолене. При работе на бедной смеси без рециркуляции отработавших газов значения индикаторного удельного содержания NO в отработавших газах после метанола примерно на 10% ниже. В условиях рециркуляции отработавших газов ($\text{EGR}_1=10$ для обоих топлив) индикаторное удельное содержание NO в отработавших га-

заний показаны на рис 18. При работе на богатой смеси с метанолом концентрация НС с увеличением рециркуляции отработавших газов снижалась, в то время как при работе на индолене этого не наблюдалось. На рис 19 показаны изменения индикаторного удельного содержания НС в отработавших газах при $\Phi_{\text{ФА}}$ для эксплуатационных условий, приведенных на рис 17. Как видно из рисунка, индикаторное удельное содержание НС в отработавших газах при работе без их рециркуляции и при любом обычном значении $\Phi_{\text{ФА}}$ разнятся менее чем на 15%. При работе на богатой смеси ($\Phi_{\text{ФА}}$ более 1) при $\text{EGR}=10$ на метаноле индикаторное удельное содержание НС в отработавших газах ниже, чем при работе на индолене, а при значениях $\Phi_{\text{ФА}}=1,0$ — $0,85$ — выше. При работе на индолене на более бедных смесях они вновь снижаются вследствие начала перебоев в зажигании.

Как видно по резкому увеличению содержания НС в отработавших газах на бедных смесях пределы с уменьшением значений $\Phi_{\text{ФА}}$ и при увеличении рециркуляции отработавших газов изменялись в соответствии с предположениями. Уровень «предельного обогащения бедной смеси» на единицу увеличивает индекс EGR почти идентично для обоих топлив, хотя при $\text{EGR}=0$ эти пределы на бедной смеси отличаются (рис 20). При одинаковом уровне рециркуляции отработавших газов пределы работы на бедной смеси для метанола по сравнению с индоленом расширяются примерно на 0,1 единицы $\Phi_{\text{ФА}}$.

Другие наблюдения. В процессе экспериментов производилось также измерение температуры во впускном и выпускном коллекторах. При температуре на впуске в карбюратор, равной $37,8^\circ\text{C}$, температура впускного коллектора понижалась на метаноле на 30°C . На индолене снижение температуры во впускном коллекторе составляло около 8°C .

Температура отработавших газов при работе на метаноле была на 11 — 39°C ниже, чем при работе на индолене. Температура отработавших газов для обоих топлив с увеличением частоты вращения двигателя, запаздывания зажигания, массового расхода топлива при любом данном значении $\Phi_{\text{ФА}}$ и рециркуляции отработавших газов обычно увеличивалась. При увеличении рециркуляции отработавших газов их температура снижалась.

Анализ результатов исследования с использованием значения $\log PV_T$ для характеристики сгорания и содержания загрязнений в отработавших газах показали, что метанол горит быстрее, чем индолен (при обычных частоте вращения вала двигателя, $\Phi_{\text{ФА}}$, опережении зажигания, рециркуляции отработавших газов и расходе воздуха). Предполагается, что более быстрое сгорание метанола связано с оптимальной установкой опережения зажигания при оптимальном крутящем моменте. Однако при значениях $\text{EGR}_1=10$ или более оптимальное опережение зажигания для наилучшего крутящего момента не устанавливалось, потому что в этом случае при наибольшем опережении зажига-

¹ Необходимо помнить, что допустимое содержание НС для метанола меньше.

ния не достигался максимальный крутящий момент. При $EGR=0$ для метанола оптимальные опережения зажигания для наилучшего крутящего момента оказывались более поздними, чем при работе на индолене. Эти результаты, полученные при $EGR=0$, согласуются с данными по оптимальному опережению зажигания для наилучшего крутящего момента, опубликованными в работе [5, 6]. В предыдущих работах по метанолу не рассматривался вопрос об использовании рециркулирующих отработавших газов и, если не считать исследование автора [6], то не рассматривались и вопросы, касающиеся характеристик сгорания.

Данные по снимаемой мощности и расходу топлива, приведенные в настоящем исследовании, согласуются с ранее опубликованными ($EGR=0$) [3, 5, 6]. При работе без рециркуляции отработавших газов и постоянной подаче воздуха в двигатель на метаноле мощность увеличивалась на 10% по сравнению с работой на индолене (одинаковые Φ_{FA} , опережение зажигания и т. п.). При добавлении рециркулирующих отработавших газов относительная мощность, получающаяся на разных топливах, несколько отличается, но на метаноле достигается постоянно более высокая мощность. Расход топлива при работе на метаноле примерно в 2 раза больше, чем на чистом индолене. Разница в расходе топлива при работе на метаноле и на индолене велика, но это не является неожиданностью, так как теплота сгорания метанола в 2 раза меньше теплоты сгорания индолена (см. табл. 1). В тех случаях, когда расход топлива выражается через энергосодержание, а не в объемных единицах, метанол выглядит значительно лучше. Расход энергии при работе на метаноле обычно на 5—10% меньше, чем при работе на индолене. Действительная разница в расходе энергии зависит от эксплуатационных условий и уровня рециркуляции отработавших газов.

Согласно исследованиям, концентрация в отработавших газах CO при работе на метаноле и на индолене зависела только от Φ_{FA} . На богатой смеси с метанолом индикаторное удельное содержание CO в отработавших газах меньше, чем при работе на индолене, а на бедной смеси на 50% больше. Содержание NO в отработавших газах при работе на обоих топливах изменяется в зависимости от эксплуатационных параметров по известным закономерностям для бензина. Индикаторное удельное загрязнение отработавших газов NO при работе на метаноле меньше, чем на индолене, при любых обычных эксплуатационных условиях. На богатой смеси без рециркуляции отработавших газов индикаторное удельное содержание NO в отработавших газах примерно в 2 раза больше при работе на метаноле, чем на индолене. На бедных смесях, особенно приближающихся к условиям работы с перебоями, содержание NO в отработавших газах при работе на метаноле на 10% ниже. При $EGR_1=10$ содержание NO в отработавших газах при работе на метаноле примерно в 4 раза ниже, чем на индолене для всех значений Φ_{FA} . Результаты определения содержания CO и NO в отработавших газах при $EGR=0$ совпада-

ют с данными предыдущих исследований с рециркуляцией отработавших газов [5, 6].

Как и предполагалось, содержание HC в отработавших газах при работе на обоих топливах также зависит от эксплуатационных параметров, состава смеси и рециркуляции отработавших газов. Некоторое отклонение от нормальной зависимости изменения содержания HC наблюдалось при увеличении рециркуляции отработавших газов на богатой смеси с метанолом, когда это приводило к снижению содержания HC в них. Без рециркуляции отработавших газов индикаторное удельное содержание HC на метаноле (согласно измерениям) примерно такое же, как и при работе на индолене. При $EGR_1=10$ на богатых смесях с метанолом содержание HC в отработавших газах было на 25% ниже, чем при работе на бедных смесях, а при работе на бедных смесях—на 35% выше. Рассматривая то обстоятельство, что современные измерения содержания HC в отработавших газах соответствуют нижним предельным значениям, можно полагать, что с точки зрения содержания HC в отработавших газах метанол не имеет никаких преимуществ. При добавлении рециркулирующих отработавших газов на обоих топливах происходит предполагавшееся обогащение бедных смесей.

Степень обогащения на единицу увеличения рециркуляции отработавших газов почти одинакова. При обычном уровне рециркуляции отработавших газов пределы обогащения при работе на метаноле расширяются примерно на 0,1 единицы Φ_{FA} по сравнению с работой на индолене.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные методы, разработанные для измерения зависимости $\log(PV^{\gamma})$ от времени или PV^{γ} от времени, представляют ценное новое средство анализа горения в двигателе. Его использование облегчает определение таких параметров горения, как период задержки воспламенения, продолжительность и скорость горения.

Общие результаты этих исследований свидетельствуют о том, что применение метанола в двигателях внутреннего сгорания не дает существенных преимуществ с точки зрения загрязнения отработавших газов. Значительно снижается содержание в отработавших газах NO, но содержание CO и HC остается примерно равным или большим, чем при работе на индолене. На метаноле достигается некоторое увеличение мощности, но за счет значительного роста расхода топлива.

С точки зрения использования энергии в двигателе метанол несколько лучше индолена.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ф. Л. Драйер (Принстонский университет). Существует интересная альтернатива применению рециркуляции отработавших

газов при работе на метаноле — работа на метаноле с добавками воды. Рассматривался ли Вами этот вопрос? В этом варианте объемная мощность двигателя должна скорее возрасти, чем снизиться или остаться на прежнем уровне.

Харрингтон. Да. Мы рассматривали этот вопрос, но мы не проводили никаких исследований в этой области. Мы знаем о том, что такие работы проводятся фирмой «Эксон».

В. Е. Бернхардт (фирма «Фольксвагенверк АГ»). Согласно Вашим данным, содержание НС в отработавших газах при работе на метаноле выше.

Как Вы измеряли содержание НС?

Харрингтон. Содержание углеводов в отработавших газах определялось в подогретом образце с помощью детектора пламенной ионизации. Мы рассматривали углеводороды в виде единой группы. Мы знаем, что в отработавших газах двигателя, работающего на метаноле, содержится большое количество несгоревшего метанола. Несгоревший метанол рассматривался как углеводород и, кроме того, допускали, что чувствительность детектора пламенной ионизации по отношению к так называемым углеводородам, образующимся при работе на метаноле, и углеводородам, образующимся при работе на индолене, будут одинаковой. В результате для метанола получились более низкие показатели.

Ф. Л. Драйер. Существуют пути экспериментального корректирования чувствительности пламенной ионизации, которая при исследовании метанола даёт заниженные результаты с помощью использования каталитически ионизируемых систем. Мне хотелось бы знать, правильно ли включение несгоревшего метанола в группу СН отработавших газов? Как видно, метанол фотохимически не очень активен.

Р. В. Харн (Управление по энергетическим исследованиям и разработкам США). Я бы хотел дополнить замечание Драйера о том, что метанол не следует приравнивать к НС в отработавших газах. Фредд считает, что мы не должны учитывать метанол, потому что он фотохимически не активен. В данном контексте это верно. Но возникает также дополнительный вопрос: должны ли учитываться токсические свойства несгоревшего метанола? Мы должны также обратить внимание и на другие продукты. Большинство из присутствующих здесь знает, что в этом отношении необходимо обратить внимание на альдегиды. Я хотел бы быть уверенным, что исследованы свойства всех продуктов сгорания метанола.

Н. А. Хенеин (Уейнский университет, штат Пенсильвания). Усмотрели ли Вы какую-либо разницу при исследовании различных циклов, работая на метаноле и на индолене?

Харрингтон. Да, когда мы работали с метанолом, то наблюдалось несколько ослабленное, циклическое изменение по сравнению с работой на индолене. Я не знаю причины. Возможно, что причиной является то обстоятельство, что для достижения одинако-

вых условий в камере сгорания приходится иметь значительно больший объем топлива.

Р. К. Швинг (исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Рассматривали ли Вы к. п. д. двигателя и выигрыш в мощности, которых можно достичь благодаря свойствам метанола?

Харрингтон. Мне кажется, что Вы имеете в виду объемный к. п. д. двигателя. В нашем исследовании поступление воздуха в двигатель регулировалось. Несмотря на то, что температура топливного заряда снижалась и можно было подавать больше воздуха, мы точно регулировали поступление воздуха и обеспечивали одинаковую его подачу. Метанол мог бы иметь преимущества при большом открытии дросселя.

Дж. П. Лонгвелл (фирма «МИТ и Эксон»). Заметили ли Вы какие-либо явления преждевременного воспламенения?

Харрингтон. Да. Когда мы проводили работы в условиях, при которых усиливается детонация на индолене, то в таких условиях при работе на метаноле наблюдались явления преждевременного воспламенения. Но, с другой стороны, при работе на метаноле никогда не наблюдалась детонация.

Дж. В. Хейвуд (Массачусетский технологический институт). Одним из вопросов, который меня интересовал, является то, что при большой частоте вращения период задержки самовоспламенения и продолжительность сгорания метанола становятся больше, чем для индолена. Можете ли Вы объяснить качественные причины такой тенденции?

Харрингтон. Только чисто умозрительно. Возможно, что турбулентность оказывает различное влияние на реакции горения этих топлив.

Дж. П. Лонгвелл. Я хотел бы продолжить тему, затронутую Хейвудом. Можно предположить, что при увеличении частоты вращения двигателя возможность преждевременного воспламенения уменьшается. Поэтому при более высокой частоте ограничивается преждевременное самовоспламенение.

Это может явиться причиной того, что характеристики индолена и метанола сближаются. Разложение метанола при преждевременном воспламенении, вероятно, приводит к образованию главным образом СО?

Харрингтон. В некоторых наших экспериментах, приближаясь к условиям работы с переборами в зажигании, мы заметили увеличение содержания СО в отработавших газах. Это, возможно, является подтверждением такого рода идеи.

В. М. Скотт (фирма «Рикардо консалтинг энджинирс»). Мне хотелось бы задать вопрос относительно оборудования, использовавшегося во время экспериментов. Вы приводили описание метода определения объема цилиндра для моделирования процесса. Я думаю, что Вы пользовались фотомеханическим способом. Могли бы Вы прокомментировать, насколько важное значение имеет точное определение объема цилиндра? И, кроме того, можете ли

Вы описать механизм, которым Вы пользовались, и сказать нам, насколько точно он измеряет расстояния?

Харрингтон. Я полагаю, что механизм, которым мы пользовались, точно копирует движение поршня в двигателе. Сигналы, соответствующие объему цилиндра, можно получать путем быстрого вращения круглого диска вокруг смещенной оси.

Скотт. Что Вы предпринимали против влияния зазора в подшипниках, от которых зависит положение поршня относительно коленчатого вала?

Харрингтон. Мы не учитывали этого. Я не думаю, что это можно учесть даже, если пользоваться для генерирования сигналов цифровыми методами.

Хейвуд. Исследователи из «Дженерал моторс», бесспорно, проделали большую работу в области точного измерения объема цилиндра двигателя, особенно в части зависимости объема от положения коленчатого вала. По их мнению, в Вашей работе для получения хорошей сходимости с расчетным индикаторным средним эффективным давлением, которую Вы подтверждали экспериментально, требовалась довольно высокая точность — порядка 1% или что-нибудь в этом роде.

Ф. Л. Драйер. Мне хотелось бы еще сказать несколько слов относительно зависимости между токсичностью и фотохимическим методом определения образования смога при работе на метаноле. Вопрос о токсичности метанола все еще остается нерешенным. Получается, что токсичность, о которой здесь говорилось, значительно превосходит опасный уровень, если его определять методом фотохимического генерирования смога. В действительности, имеется много свидетельств того, что метанол при вдыхании организмом не абсорбируется.

МОЩНОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ НА МЕТАНОЛЕ

У. Е. БЕРНХАРДТ, У. ЛИ
Фирма «Фольксвагенверк АГ», Вольфсбург, ФРГ

На основании лабораторных и дорожных испытаний было установлено, что метанол представляет собой перспективное «чисто» сгорающее автомобильное топливо. При работе на метаноле возникают небольшие проблемы, которые могут быть преодолены. Ряд автомобилей, производимых фирмой «Фольксваген», был переведен на метанол. В этих автомобилях впускной коллектор снабжен комбинированным нагревательным устройством, использующим как тепло охлаждающей жидкости двигателя, так и подогрев отработавшими газами. Конечно, в этих автомобилях модифицирован карбюратор. На основании испытаний установлено, что при работе на метаноле достигалась большая мощность вследствие более высокой скрытой теплоты испарения метанола, что позволяло охлаждать горючую смесь в большей степени, чем при испарении бензина. Благодаря этому можно увеличить плотность топливно-воздушной смеси, а следовательно, и массовый расход. Выигрыш в мощности при работе на метаноле достигает примерно 10%.

При эксплуатации автомобиля на метаноле возникает необходимость в использовании вспомогательного устройства для холодного запуска, если окружающая температура ниже 8°C. Для улучшения запуска при низкой температуре и прогрева двигателя имеется ряд возможностей, в том числе применение летучих пусковых добавок (например, бутан, метиловый эфир, бензин), которые впрыскиваются во всасываемый воздух при запуске двигателя, или использование небольшого пламени для подогрева впускного коллектора.

При работе на чистом метаноле проблемы образования паровых пробок не возникает. Дальнейшие испытания автомобилей на метаноле показали приемлемую или хорошую способность к движению при низких температурах.

Топливная экономичность определялась наряду с исследованием отработавших газов, способности автомобилей на метаноле к движению и удельного расхода топлива. В связи с тем, что энергоемкость метанола меньшая, чем у бензина, при работе на нем удельный расход топлива значительно больший, чем при работе на бензине. Однако расход топлива, отнесенный к выделяющейся энергии, меньше, чем при работе на бензине. Это означает, что метанол сгорает более эффективно, чем бензин. При 2000 об/мин и широко открытой дроссельной заслонке увеличение мощности на валу двигателя достигало 17%.

Эксплуатация двигателей на метаноле дает возможность снизить содержание загрязнений в отработавших газах, а следовательно, и загрязнение окружающего воздуха. Содержание окиси углерода в отработавших газах при работе на метаноле примерно такое же, как и при работе на бензине. Однако испытания, проведенные на автомобилях фирмы «Фольксваген» с четырехцилиндровыми двигателями ПАСКАТ при полностью открытом дросселе на различных скоростях показали возможность снижения содержания СО в отработавших газах после метанола по сравнению с бензином, особенно при малой частоте вращения двигателя.

На метаноле удается значительно снизить в отработавших газах содержание окислов азота (NO_x). Кроме того, в отработавших газах наблюдалось значительно меньшее содержание и несгоревших углеводородов (НС), а среди органических загрязнений, определенных газохроматографическим методом с помощью детектора пламенной ионизации, было обнаружено всего около 10% несгоревших углеводородов. Таким образом, метанол как автомобильное топливо с экологической точки зрения по содержанию в отработавших газах СН вполне приемлем.

Содержание альдегидов в отработавших газах при одинаковых степенях сжатия двигателя, работающего на метаноле, значительно выше, чем на бензине. Однако содержание альдегидов в отработавших газах может быть снижено увеличением степени сжатия двигателя и ограничением процесса горения путем добавления к метанолу до 10% воды.

Содержание в отработавших газах полициклических ароматических углеводородов, в том числе канцерогенных, при работе на метаноле более чем на порядок меньше, чем на бензине.

Введение. По мере истощения или приближения к истощению мировых запасов нефти, что, согласно прогнозам, должно произойти в течение ближайших 25—30 лет, исследование возможностей использования в автомобилях ненефтяных топлив стало настоятельной необходимостью. В этом плане наибольшее внимание привлекают такие заменители автомобильного бензина, как метанол, получаемый из угля или отходов (городских, древесных сельскохозяйственных), и бензиноподобные топлива, получаемые из угля и горючих сланцев. Но получение заменителей нефтяных топлив, не считая метанола, связано с преодолением больших трудностей. Так, например, продукты, получаемые из горючих сланцев, согласно оценке, должны быть дешевле метанола, но при добыче больших количеств горючих сланцев возникает проблема ликвидации огромных количеств отходов и использования обшир-

ной территории выработок. Технология производства бензина из угля известна, однако, для того, чтобы она стала экономически перспективной, требуется дальнейшее ее усовершенствование. Еще одним очень интересным заменителем автомобильного топлива является водород, получаемый из угля или из воды, если для получения водорода из воды будет использоваться ядерная энергия.

Но технология производства водородного автомобильного топлива будет доступна не ранее 2000 г.

То, что в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания могут использоваться спирты, было известно еще в 1876 г., когда был изобретен двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием [1—4]. В последние годы в связи с ограничениями содержания загрязнений в автомобильных отработавших газах стал проявляться интерес к использованию в качестве автомобильного топлива спиртов, при работе на которых происходит меньшее загрязнение атмосферного воздуха [1, 5, 6]. Однако до настоящего времени спиртовые топлива не получили распространения из-за двух основных причин: более высокой стоимости спирта по сравнению с бензином и отсутствием технических или экономических преимуществ, компенсирующих эту высокую стоимость.

Повышенный интерес к спиртовым топливам, особенно к метанолу, обусловлен в настоящее время следующими причинами: метанол может производиться синтетически из угля по известной технологии и конкурентоспособной цене [7, 8, 9]; метанол может храниться и распределяться так же, как и бензин [10, 12]; метанол в экологическом аспекте более приемлем, чем синтетический бензин или другие не нефтяные топлива, потому что при работе на нем содержание загрязнений в отработавших газах меньше [10]; путем добавления к неэтилированному бензину до 15% метанола можно значительно увеличить ресурсы автомобильного топлива [12]; применение метанола дает возможность использовать конструкции двигателей с более высокой степенью сжатия и достичь тем самым повышения топливной экономичности [12].

Сведения относительно автомобилей с двигателями, приспособленными для работы на метаноле, и достигаемой при этом мощности, а также характеристики отработавших газов в литературе весьма ограничены. Это касается прежде всего данных о содержании в отработавших газах загрязнений: углеводородов (НС), альдегидов (А) и окислов азота (NO_x). Поэтому нашей целью являлось получение восторонней информации относительно загрязнения окружающего воздуха при работе на чистом метаноле.

Результаты наших исследований дадут возможность лучше понять важную роль, которую может сыграть в будущем использование метанола в качестве автомобильного топлива.

Мощностная характеристика двигателя. Испытания проводились на стенде с четырехцилиндровыми двигателями Фольксва-

ген объемом 1,6 л с водяным охлаждением. При определении топливной экономичности и содержания загрязнителей в отработавших газах при испытаниях на стендах регулировалась температура.

Подготовка топливно-воздушной смеси. Карбюратор и впускная система двигателя были модифицированы таким образом, чтобы можно было увеличивать расход топлива с целью получения максимально однородной топливно-воздушной смеси. Для улучшения распыла топлива был модифицирован стандартный карбюратор.

Впускной коллектор подогревался после прогрева двигателя охлаждающей жидкостью и, кроме того, отработавшими газами, которые подавались с постоянным расходом. Это делалось потому, что скрытая теплота парообразования метанола примерно в 3,5 раза больше скрытой теплоты парообразования бензина. Если не будет подаваться тепло извне при испарении жидкого метанола в спирто-воздушной смеси, температура смеси будет снижаться примерно на 125°C . Если же подводить тепло извне, то температуру метанольно-воздушных смесей можно поддерживать на уровне $7-19^\circ\text{C}$ на всех частотах вращения двигателя при полностью открытой дроссельной заслонке. В противоположность этому, как показано на рис. 1, температура бензино-воздушной смеси, поступающей в четырехцилиндровый двигатель с водяным охлаждением при различной частоте вращения и полностью открытой дроссельной заслонке примерно на 10°C выше. На рис. 1 видно, что, несмотря на дополни-

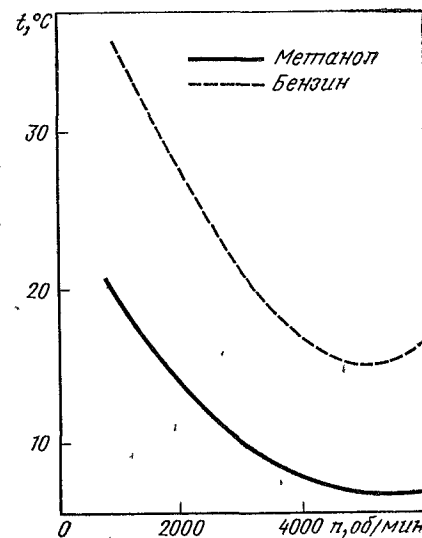


Рис. 1 Температура горючей смеси при работе на метаноле и бензине в зависимости от частоты вращения вала (степень сжатия — 9,7, зажигание обеспечивает максимальную мощность)

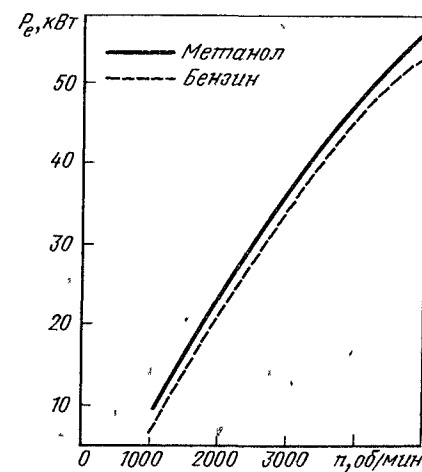


Рис. 2 Мощность двигателя при работе на метаноле и бензине в зависимости от частоты вращения вала (степень сжатия — 9,7, зажигание обеспечивает максимальную мощность)

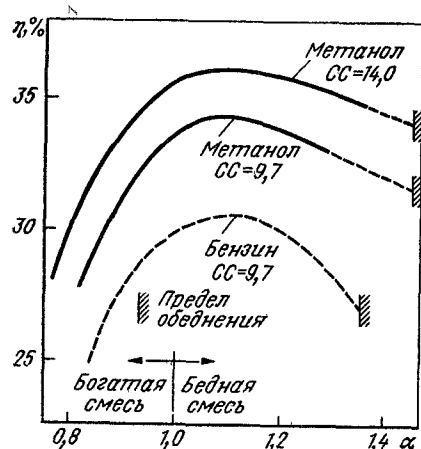


Рис 3 К п д 4-цилиндрового двигателя при работе на метаноле и бензине при различной степени сжатия (CC) в зависимости от коэффициента избытка воздуха α (частота вращения вала двигателя — 2000 об/мин, при полностью открытой дроссельной заслонке)

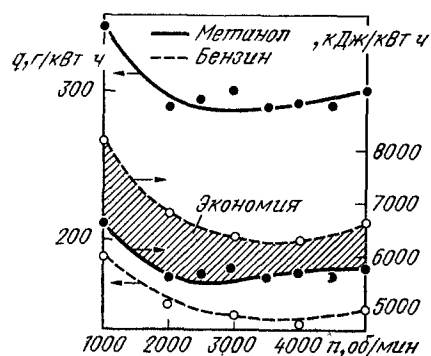


Рис 4 Удельный расход топлива (q) и энергии (ϵ) при работе на метаноле и бензине в зависимости от частоты вращения вала

прообразования метанола и содержанием большей массы топлива в единице объема его смеси с воздухом. Из рис 3 видно также, что при увеличении степени сжатия с 9,7 до 14,0 мощность двигателя дополнительно возрастает. При 2000 об/мин, полностью открытой дроссельной заслонке и соотношении воздуха и топлива в рабочей смеси эффективная мощность на валу при работе на бензиновом двигателе со степенью сжатия 9,7 равна 30% от вы-

тельный обогрев метанольно-воздушной смеси, не удавалось добиться идентичных температур с бензино-воздушной смесью.

Полезная мощность двигателя. При одинаковых температуре и давлении рабочие смеси с метанолом и бензином имеют почти одинаковую теплоту сгорания (в ккал/м³). В связи с тем, что у метанола более высокая скрытая теплота парообразования, всасываемый воздух и, следовательно, метанольно-воздушная смесь охлаждаются в большей степени. В результате этого повышается эффективная мощность двигателя. На рис 2 показана полезная мощность двигателя при работе на бензине и чистом метаноле в зависимости от частоты вращения. При этих и других эксплуатационных условиях полезная мощность на метаноле была на 10% больше, чем при работе на бензине (зажигание установлено на максимальную мощность).

Мощность двигателя и расход топлива. Из рис 3 можно видеть, что при одинаковой степени сжатия [9, 7] и работе на метаноле достигаются значительно более высокие индикаторные мощности, чем при работе на бензине. Это обусловлено главным образом большим коэффициентом наполнения двигателя в связи с большей плотностью метанольно-воздушных смесей [13], которая обусловлена высокой скрытой теплотой па-

деленной при сгорании, а при работе на метанольном двигателе со степенью сжатия 14,0 она достигает 36%, или на 20% больше. Благодаря тому, что чистый метанол обладает высокой детонационной стойкостью (октановое число по исследовательскому методу 110, а по моторному методу — 92 [9]), степень сжатия двигателя может быть повышена до 14,0. О влиянии более высокой степени сжатия на состав газов будет сказано ниже.

На рис 4 приводится сравнение расходов топлива при работе на метаноле и на бензине. При работе на метаноле, если расходы отнести к объему или массе, наблюдается более высокий удельный расход топлива (примерно в 2 раза). Однако, как видно из рис 4, если расходы топлива отнести к получаемой энергии, то при 2000 об/мин и полностью открытой дроссельной заслонке расход метанола примерно на 16% меньше, чем бензина. Аналогичные результаты были получены в Коноко на двигателе V8, который расходовал на 15—26% меньше энергии при работе на метаноле, чем на бензине [14].

Проблемы пуска двигателя при низкой температуре и его прогрев. Для пуска двигателя, работающего на метаноле, при температуре ниже 8°C обязательно требуется использование пусковых жидкостей. Имеется несколько возможностей для улучшения низкотемпературных свойств метанола. В качестве присадок к метанолу можно добавлять такие летучие вещества, как бутан, метиловый эфир и бензин. Их можно также впрыскивать во всасывающую систему во время запуска двигателя. Без пусковых жидкостей можно подогревать впускной коллектор пламенным подогревателем, работающим на метаноле. Идеального решения этой проблемы пока не найдено.

Характеристика прогрева двигателя, работающего на метаноле, зависит главным образом от степени распыления топливно-воздушной смеси, эффективности подогревательного устройства, смонтированного во впускной системе, однородности распределения топливно-воздушной смеси по цилиндрам двигателя.

Поэтому насколько возможно необходимо совершенствовать подготовку и распределение топливно-воздушной смеси. Причиной неудовлетворительного прогрева и трудного запуска двигателя является главным образом плохое испарение метанола в карбюраторе и во впускной системе, предназначенной для работы на бензине. Оптимальное решение этой проблемы, очевидно, состоит в разработке новых карбюраторов или устройств, подобных Дрессераторам [14, 15].

Характеристика прогрева двигателей в автомобилях фирмы «Фольксваген» (AUDI-80, NSU-Ro80, VW-Dasher и VW-Scirocco) определялась при низкой температуре окружающей атмосферы. Как и ожидалось, при использовании подогрева впускного коллектора результат был очень хорошим. С ускорением движения автомобилей заметных отклонений от нормы не наблюдалось.

Характеристика состава отработавших газов. Во время испытаний двигателей на стенде от впускной систе-

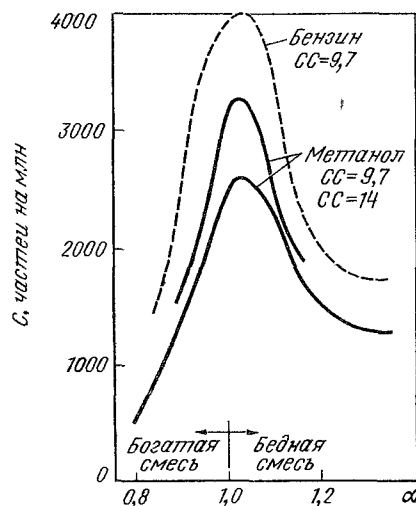


Рис 5 Концентрация NO_x в отработавших газах при работе двигателя на метаноле и бензине при различной степени сжатия (CC) в зависимости от α

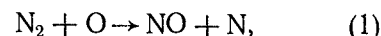
3-метил-2-бензотиазолон гидразона (МБТГ). В дальнейшем пробы отработавших газов, содержащих метанол, углеводороды и альдегиды, анализировались с помощью газоанализатора Перкин Эльмер (модель 6), оборудованного двумя колоннами и детекторами пламенной ионизации.

Оксиды азота. Содержание оксидов азота NO_x в отработавших газах после метанола и бензина отличается. На рис 5 можно видеть изменение концентрации NO_x в отработавших газах при работе двигателя на 2000 об/мин с полностью открытой дроссельной заслонкой и при установке опережения зажигания, соответствующего максимальной мощности. В двигателях со степенью сжатия 9,7 содержание оксидов азота при работе на богатой смеси снижается значительно, в то время как при работе на стехиометрической и бедной смеси снижается в меньшей степени. Совершенно неожиданное снижение концентрации NO_x происходит при повышении степени сжатия метанольного двигателя с 9,7 до 14,0. Является ли причиной такого снижения концентрации NO_x более высокая степень сжатия или различие в конструкции камер сгорания двигателей, пока неизвестно.

Пониженное содержание оксидов азота в отработавших газах двигателя при работе на метаноле может быть обусловлено более низкой температурой в послепламенной области камеры сгорания. Для определения средней температуры сгоревших газов может быть использована модель с двумя зонами распространения пламени, как это делалось предыдущими исследователями

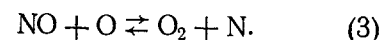
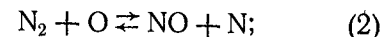
мы двигателя по пробоотборному трубопроводу в газоанализатор непрерывно отводились отработавшие газы. По второму подогреваемому пробоотборному трубопроводу отводились пробы содержащие воду, для газохроматографического и мокрого химического анализа. В качестве приборов для анализа отработавших газов использовались не дисперсионный инфракрасный анализатор (НИКА) для определения содержания окиси углерода, детектор пламенной ионизации (ДПИ) для определения содержания углеводородов и химический люминесцентный детектор для определения содержания окислов азота. Общее содержание альдегидов определялось по методу МБТГ [8], который заключался в пропуске исследуемого газа через склянку с раствором

[16] Масса сгоревшей фракции, требующаяся для проведения расчетов, определяется на основании данных термодинамического анализа процесса сгорания в двигателе [16]. Как и для бензина, на основании расчетов температуры горения для метанола установлена нижняя пиковая температура (ниже 250°C) [13]. Эта нижняя температура горения газа оказывает значительное влияние на распределение кислорода в послепламенной области, в результате чего образуется меньше атомарного кислорода. А поскольку реакцией, определяющей скорость образования окиси азота, является



то при чрезвычайно низкой концентрации атомарного кислорода образование окиси азота будет ограничено.

В работах [16, 17] было показано, что для описания образования окиси азота в двигателе, работающем на бензине, может быть использована простая математическая модель. Согласно механизму реакций по Зельдовичу термодинамический анализ процесса сгорания в двигателе основан на двухзонной модели распространения пламени



Из рис 6 видно, что эта математическая модель пригодна также и для метанола.

Оксид углерода. Более высокая скорость сгорания метанола сопровождается сжиганием рабочей смеси при большей скорости распространения пламени. Благодаря меньшему содержанию углерода в молекуле метанола и лучшей диссоциации при

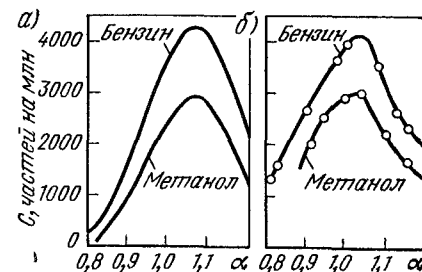


Рис 6 Расчетные (а) и измеренные (б) концентрации NO_x в отработавших газах при работе двигателя со степенью сжатия 9,7 на метаноле и бензине (дроссель полностью открыт) в зависимости от α

а — частота вращения вала двигателя — 2600 об/мин, степень сжатия — 9,7, опережение зажигания — 30° , б — частота вращения вала — 2000 об/мин, опережение зажигания — 27°

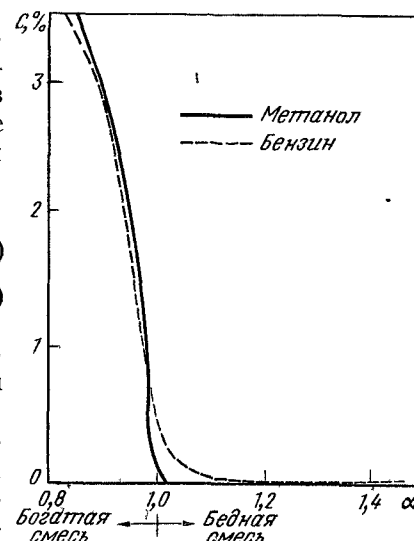


Рис 7 Концентрация CO в отработавших газах двигателя при работе на метаноле и бензине в зависимости от α

низких температурах достигается более полное сгорание. Содержание в отработавших газах окиси углерода (СО) после метанола примерно соответствует содержанию окиси углерода при работе двигателя на бензине. Однако при смеси, близкой стехиометрической (отношение воздух—топливо эквивалентно $\Phi=1$), в области $\Phi=1,0-1,1$ содержание СО значительно падает. На рис. 7 показана в зависимости от Φ концентрация СО в отработавших газах четырехцилиндрового двигателя со степенью сжатия 9,7 при полной нагрузке и при 2000 об/мин (установка опережения зажигания обеспечивает максимальную мощность)

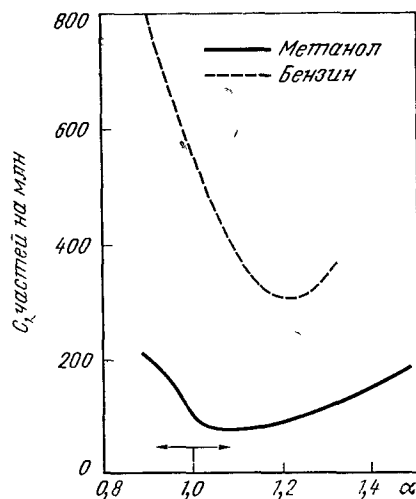


Рис 8 Концентрация НС в отработавших газах двигателя при работе на метаноле и бензине в зависимости от α

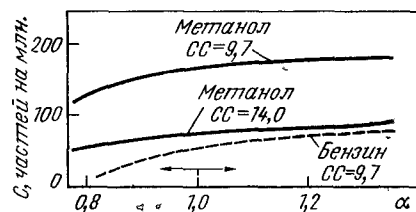


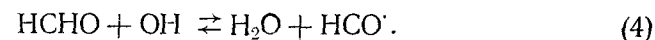
Рис 9 Концентрация альдегидов в отработавших газах двигателя при работе на метаноле и бензине при различной степени сжатия (СС) в зависимости от α

Углеводороды. При работе двигателя на метаноле содержание НС* в отработавших газах очень низкое. Однако необходимо иметь в виду, что несгоревший метанол и альдегиды (формальдегид+ацетальдегид) в отработавших газах регистрируются детектором пламенной ионизации не точно. Путем сравнения данных, полученных с помощью детектора пламенной ионизации и метода газовой хроматографии, было установлено, что для корректирования результатов, полученных с помощью детектора пламенной ионизации, необходимо пользоваться коэффициентом 1,28. Но даже с учетом этого коэффициента в отработавших газах при работе двигателя на метаноле НС всегда оказывается меньше. Из рис. 8 можно видеть, что при работе на двигателе со степенью сжатия 9,7, полностью открытой дроссельной заслонке и установке опережения зажигания, обеспечивающей максимальную мощность, содержание в отработавших газах НС при работе на метаноле составляет от 25 до 33% содержания НС при работе на бензине. Кроме того, количество видов соединений при работе на метаноле значительно меньше, чем при работе на бензине [13].

Альдегиды. Содержание в отработавших газах альдегидов при работе двигателя со степенью сжатия 9,7 на метаноле значительно выше, чем при работе на бензине. На рис. 9 показана суммарная их концентрация, определенная методом МБТГ. В среднем концентрация альдегидов при всех исследованных отношениях воздух — топливо (метанол) примерно в 2 раза больше, чем при работе на бензине. Однако при увеличении степени сжатия двигателя с 9,7 до 14,0 концентрация альдегидов резко падает. В этом случае общая концентрация альдегидов при работе двигателя на метаноле соответствует их концентрации при работе на бензине. Отметим, что это очень важный результат.

Снижение концентрации альдегидов в отработавших газах при работе двигателя на метаноле, если невозможно увеличить степень сжатия, достигается добавлением к метанолу воды. При этом одновременно снижается также концентрация NO_x (рис. 10). При добавлении 10% воды концентрация НС и СО в отработавших газах остается практически неизменной, в то время как NO_x снижается примерно на 50%, а альдегидов — примерно на 40%. Однако при этом снижается на 10% и снимаемая мощность. Но, учитывая, что на метаноле двигатель может развивать мощность на 10% больше, чем на бензине, мощность двигателя при работе на метаноле с 10% воды будет примерно такой же, как мощность двигателя при работе на бензине. Испытания проводились на четырехцилиндровом двигателе с водяным охлаждением, со степенью сжатия 9,7 и работе на полной нагрузке (полностью открытая дроссельная заслонка) при 3000 об/мин. Если учесть содержание воды, то отношение воздух—топливо во время этих испытаний окажется на 5% беднее.

Быстрое снижение концентрации альдегидов в отработавших газах при увеличении содержания воды объясняется в основном следующей реакцией между формальдегидом и гидроксильным радикалом:



Источником гидроксильных радикалов может быть следующая реакция:

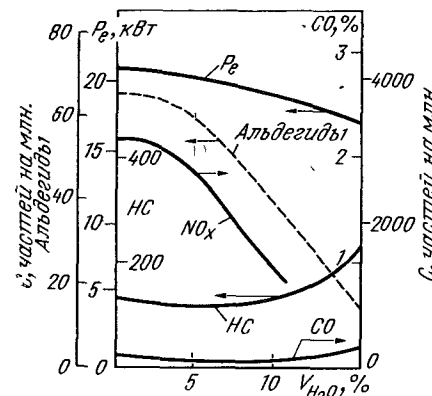
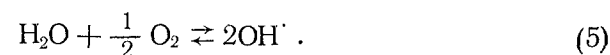


Рис 10 Влияние добавления воды к метанолу на содержание загрязнений в отработавших газах и на мощность двигателя

* При работе двигателя на метаноле под НС следует понимать не только углеводороды, но и альдегиды, а также несгоревший метанол

С другой стороны, реакция (5) оказывает влияние на реакцию, определяющую скорость (1) образования окиси азота. Вследствие недостатка атомарного кислорода, обусловленного реакцией (5), образование окиси азота будет ограничиваться. В связи с этим при добавлении к метанолу воды, как это видно из рис 10, возможно одновременное снижение содержания в отработавших газах альдегидов и окиси азота [10].

Полициклические ароматические углеводороды На рис 11 приводятся типичные результаты анализа содержания полициклических ароматических углеводородов (ПЦА) в отработавших газах автомобилей с двигателями, работающими на метаноле и бензине. Пробы были взяты во время проводившихся испытаний по Европейскому методу (ECE). Анализировались углеводороды, кипящие в диапазоне от флуорантена до коронена [19]. Часть ПЦА относится к сильно канцерогенным веществам. Таких углеводородов после метанола более чем на порядок меньше, чем после бензина.

Содержание в отработавших газах твердых частиц В отработавших газах двигателя после метанола соединений свинца не содержится. Благодаря высокой детонационной стойкости метанола добавление к нему тетраэтилсвинца или другого соединения свинца излишне. Кроме того, во время сгорания метанола сажи не образуется. В отработавших газах после метанола не содержится также сернистых соединений.

Взаимодействие загрязнений, содержащихся в отработавших газах. На рис 12 показано взаимодействие загрязнений (NO , HC и CO), содержащихся в отработавших газах. Поскольку из всех

окислов азота основным соединением, обнаруженным в отработавших газах при работе двигателя на бензине или метаноле, является сама окись азота, ее концентрация приблизительно соответствует суммарному содержанию окислов азота. Концентрация окиси азота в отработавших газах при полностью открытой дроссельной заслонке двигателя со степенью сжатия 9,7 и 2700 об/мин после метанола примерно вдвое меньше, чем после бензина. Более низкая концентрация окиси азота при высокой частоте вращения двигателя объясняется главным образом богатой топливно-воздушной смесью.

Из рис 12 видно, что при полностью открытой дроссельной заслонке и особенно при низкой частоте вращения двигателя можно снизить содержание CO в отработавших газах двигателя, работаящего на метаноле. Если принять во внимание, что концентрация HC , определяемая с помощью детектора пламенной ионизации, соответствует лишь 10% углеводородов, определяемых методом газовой хроматографии, станет ясным, что в экологическом отношении двигатели, работающие на метаноле, лучше двигателей, работающих на бензине.

Токсикологические аспекты В целом характеристика отработавших газов, образующихся при работе двигателя на метаноле, лучше, чем при работе на бензине. Токсичность метанола сравнима с токсичностью традиционных топлив (бензина). В этом отношении метанол может рассматриваться менее опасным, чем некоторые компоненты бензина, как, например, бензол. Тем не менее следует отметить, что и метанол и бензин токсичны. Поэтому ни одно из этих топлив не следует принимать вовнутрь, вдыхать, перекачивать сифоном или использовать в качестве растворителя для чистки.

Оценка автомобиля. Фирма «Фольксваген» переоборудовала ряд стандартных бензиновых двигателей, в том числе VW Scirocco, для работы на метаноле. Для улучшения низкотемпературной характеристики при работе на метаноле требовалось во время запуска двигателя вырыскивание бензина или другого легкоиспаряющегося горючего вещества во впускной коллектор. Кроме того, возникла необходимость в замене некоторых деталей, изготовленных из материалов, растворимых в метаноле, таких, как

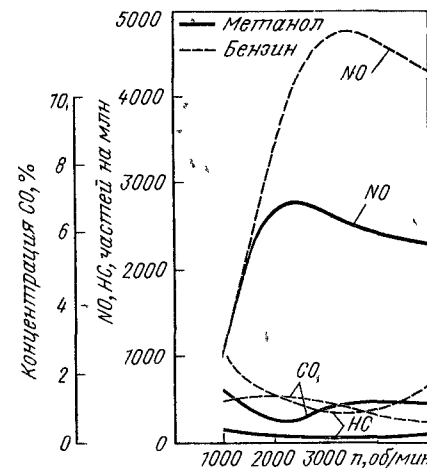


Рис 12 Влияние частоты вращения вала двигателя на содержание загрязнений в отработавших газах при работе на метаноле и бензине с полностью открытым дросселем

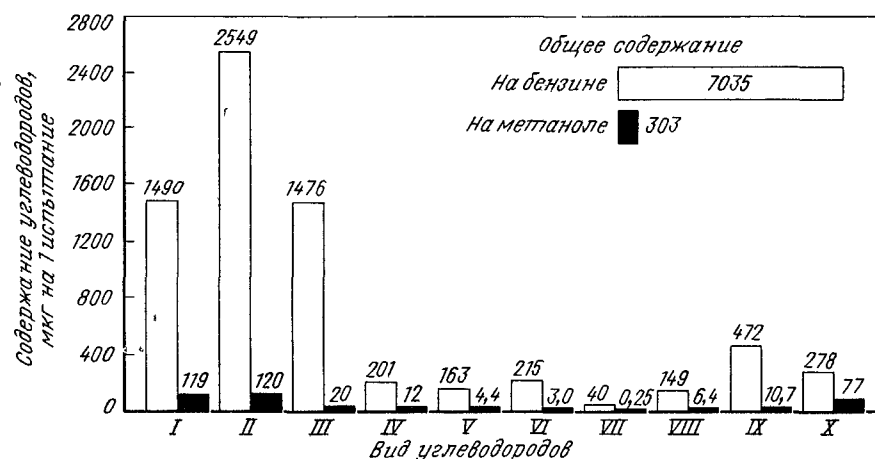


Рис 11 Содержание полициклических углеводородов в отработавших газах двигателя при работе на метаноле и бензине

I — флуорантен II — пирен, III — хризен+метил, IV — бензофлуорантен V — бензпирен, VI — бенз а пирен, VII — перилен, VIII — инден, IX — бензгалайдгидроинденопирен, X — коронен

пластмассовый поплавков, диафрагмы и прокладки В связи с тем, что емкость топливных баков не была увеличена, радиус действия автомобилей при работе на метаноле был примерно вдвое меньше, чем при работе на бензине Решение проблем смесеобразования и распределения смеси облегчается с помощью использования изготавливаемых промышленностью механических или электрических систем впрыска, например непосредственного впрыска во впускной клапан. С помощью добавок легкоиспаряющихся компонентов, например веществ, уже содержащихся в неочищенном метаноле, или присадок вроде диметилового эфира, диэтилового эфира, этил-метилового эфира или третичного метил-этилового эфира, можно значительно улучшить низкотемпературные характеристики и снизить содержание загрязнений в отработавших газах.

Оценка автомобиля проводилась главным образом в моделированных дорожных условиях с использованием метода CVS для оценки загрязнений низкотемпературных и высокотемпературных отработавших газов и по Европейскому методу испытаний (ECE) Впоследствии автомобили, приспособленные для работы на метаноле, проходили дорожные испытания, при которых определялись расход топлива, динамика и характеристика прогрева Как указывалось выше, на современном уровне технического прогресса в этой области расход топлива (энергетический) и динамика оказались очень хорошими или приемлемыми.

Расход топлива. В табл. 1 приводятся сведения о расходе топлива при работе двигателя на метаноле и на бензине, определенном по методу ECE. Энергетическое преимущество при работе двигателя на метаноле по сравнению с работой на бензине, определенное по методу ECE, при низкотемпературном запуске составило всего 4%, а при горячем запуске — 12%. При работе на чистом метаноле обязательно требуется улучшение характеристики прогрева двигателя. Высокие антидетонационные свойства метанола дают возможность дальнейшего повышения

Таблица 1 Расход топлива во время испытаний по методу ECE

Топливо	Условия проведения испытания	Расход топлива	
		г/испытание	кДж/испытание
Бензин	Низкотемпературный пуск двигателя	373	16 394
	Пуск прогретого двигателя	328	14 417
Метанол чистый (М-100)	Низкотемпературный пуск двигателя	801	15 757
	Пуск прогретого двигателя	644	12 669
85% бензина + 15% метанола (М-15)	Низкотемпературный пуск двигателя	360	14 431
	Пуск прогретого двигателя	310	12 426
10% бензина + 90% метанола (М-90)	Низкотемпературный пуск двигателя	716	15 725
	Пуск прогретого двигателя	619	13 594

Таблица 2 Содержание загрязнений в отработавших газах (метод ECE)

Топливо	Условия проведения испытания	СО		НС, определенные детектором пламенной ионизации	
		г/испытание	Отношение к бензину	г/испытание	Отношение к бензину
Бензин	Низкотемпературный пуск двигателя	136	1	9,8	1
	Пуск прогретого двигателя	112	1	7,9	1
Метанол	Низкотемпературный пуск двигателя	102	0,75	12,0	1,22
	Пуск прогретого двигателя	36	0,32	5,7	0,72
Смесь М-15	Низкотемпературный пуск двигателя	56	0,41	8,3	0,85
	Пуск прогретого двигателя	34	0,30	6,5	0,82

полезной мощности и одновременного улучшения расхода топлива путем увеличения степени сжатия. В табл. 1 показано также влияние на расход топлива добавления к бензину 15% метанола (М-15). В этом варианте, согласно методу ECE (при холодном запуске), снижение массного расхода топлива составило 3,5%. Если измеренный расход топлива пересчитать на расход энергии, то снижение при работе на М-15 составит 12%. В табл. 1 показано также, что добавление к метанолу легкоиспаряющихся компонентов (таких, как бензин) в концентрации примерно 10% по объему (М-90) не улучшает расход энергии по сравнению с чистым метанолом (М-100).

Загрязнения в автомобильных отработавших газах. В табл. 2 приводятся данные, полученные по методу ECE, о содержании в отработавших газах загрязнений при работе двигателя на чистом метаноле, а также на топливе М-15. При холодном запуске в отработавших газах двигателя после метанола содержание СО снижалось на 25%, а содержание НС, определенное с помощью детектора пламенной ионизации, увеличивалось на 22%. При горячем запуске содержание СО в отработавших газах снижалось на 68%, а НС — на 28%. В обоих испытаниях наблюдалось снижение окислов азота на 20%. Такая характеристика содержания загрязнений в отработавших газах может быть улучшена путем оптимизации, особенно во время горячего запуска. Содержание загрязнений в отработавших газах при работе на метаноле определялось и на другом автомобиле во время федеральных испытаний (с холодным запуском), проводившихся в 1975 г. [9]. В этих испытаниях при работе на высокооктановом бензине в отработавших газах содержание НС составило 2,8 г/км, СО=13,7 г/км и NO_x=3,5 г/км. При работе двигателя на метаноле содержание НС снижалось и составляло 44%, окиси углерода — 58%, окислов азота — 67% от загрязнений после бензина. Таким образом, при работе

двигателя на метаноле удовлетворялись федеральные требования стандарта 1975 г на содержание загрязнений в отработавших газах ($\text{HC}=0,9$ г/км, $\text{CO}=9,3$ г/км и $\text{NO}_x=1,9$ г/км) по CO и NO_x , но не по содержанию HC. Учитывая, что загрязнения HC, содержащиеся в отработавших газах двигателя после метанола, были представлены лишь главным образом следующими углеводородами метаном, этаном и этиленом, а содержание в них полициклических ароматических углеводородов очень невелико, очевидно, что при работе двигателя на метаноле проблем токсического действия на организм человека не существует.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

На основании экспериментальных данных и теоретического анализа можно сделать следующие выводы.

1 При работе двигателя на метаноле по сравнению с работой на бензине достигается повышение мощности, снижение удельного расхода энергии и увеличение коэффициента полезного действия.

2 При работе на метаноле в отработавших газах значительно снижается содержание окислов азота. Механизм образования NO_x в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания после бензина может быть распространен и для случая работы на метаноле.

3 Содержание в отработавших газах окиси углерода как при работе двигателя на метаноле, так и при работе на бензине примерно одинаково. Однако при работе на смеси, близкой к стехиометрической и обедненной на 10%, содержание CO в отработавших газах после метанола меньше.

4 Содержание углеводородов в отработавших газах после метанола значительно ниже, чем после работы на бензине. Анализ содержания HC с помощью детектора пламенной ионизации следует проводить с определенной осторожностью. Содержание в отработавших газах метанола и альдегидов после двигателей с одинаковой степенью сжатия при работе на метаноле существенно выше, чем при работе на бензине. После метанола содержание альдегидов примерно в 2 раза больше, чем после бензина, однако оно может быть значительно снижено увеличением степени сжатия двигателя или добавлением к метанолу воды.

5 Отличная детонационная стойкость метанола дает возможность увеличивать степень сжатия двигателя до 14. При этом достигается улучшение расхода топлива и коэффициента полезного действия, а также снижение содержания в отработавших газах NO_x и альдегидов.

6 Содержание полициклических ароматических углеводородов в отработавших газах после метанола меньше, чем после работы двигателя на бензине.

7 Холодный пуск и способность к движению при испытании автомобилей, работавших на метаноле, были по крайней мере

приемлемыми. Дальнейшие усовершенствования главным образом в области расхода топлива и содержания в отработавших газах загрязнений могут быть достигнуты путем улучшения прогрева двигателя и системы впускного коллектора, особенно в период первых 200 с после пуска.

8 Двигатели с искровым зажиганием, на которых оценивали мощность и содержание загрязнений в отработавших газах, были сконструированы из расчета применения на них бензина и затем переделаны для работы на метаноле. На двигателях, сконструированных специально для работы на метаноле, можно будет максимально использовать преимущества метанола.

ОБСУЖДЕНИЕ

А. А. Квадер (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Вы говорили, что для исследования сгорания при высоких степенях сжатия использовался другой двигатель. В чем заключалась разница между формами камеры сгорания в двигателе со степенью сжатия 9,7 и 14?

Бернхардт. При повышении степени сжатия двигателя форма камеры сгорания меняется незначительно. Мы не пользовались различными камерами сгорания. Для повышения степени сжатия мы изменяли лишь объем камеры сгорания. И все.

Н. Д. Бринкман (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). На каком отношении воздух/топливо работали двигатели на метаноле и каковы эти отношения для бензина?

Бернхардт. Мы обычно эксплуатировали двигатель на бензине при несколько обогащенной смеси (примерно на 2%), а при работе на метанольно-бензиновых смесях — на обедненной смеси (примерно на 5%). При работе двигателя на чистом метаноле также использовались смеси, обедненные примерно на 5%. Эксплуатация двигателя на несколько обедненных смесях при работе на чистом метаноле не вызывает никаких проблем.

Х. К. Хуффман (фирма «Юнион ойл компани оф Калифорния»). Принимались ли меры предотвращения обводнения бензино-метанольной смеси при хранении и проведении испытаний? Если нет, то с какими проблемами, связанными с расслоением бензино-метанольной смеси Вам пришлось столкнуться?

Бернхардт. Мы не принимали специальных мер для удаления влаги из воздуха, поступающего в топливные баки. До сих пор нам не приходилось встречаться с такого рода проблемами. Но следует отметить, что содержание воды в бензино-метанольных смесях, которыми мы пользовались, было очень низким. В чистом метаноле оно составляло менее 0,05% по массе. Содержание ароматических углеводородов в смесях на бензиновой основе составляло 35%. Суммарное содержание ароматических углеводородов и воды является очень важным параметром, когда приходится иметь дело с метанольно-бензиновыми смесями.

Р. М. Кампо (фирма «Форд мотор компани»). Пытались ли Вы вместо добавления воды для снижения содержания в отработавших газах альдегидов пользоваться каталитическими дожигателями?

Берихардт. В настоящее время у нас не было оснований для применения каталитических дожигателей. Применение каталитических дожигателей возможно, однако мы предпочли при эксплуатации двигателей на метаноле ими не пользоваться.

С. Грач (фирма «Форд мотор компани»). У меня три вопроса. В Вашей последней таблице, в которой приводятся данные о содержании в отработавших газах НС во время холодного запуска двигателя, показано, что их содержание при работе на метаноле на 22% больше, чем при работе на бензине. Мне непонятно, почему Вы утверждаете, что при работе двигателя на метаноле в отработавших газах содержится меньше НС? Второй вопрос касается токсичности метанола. Вы утверждаете, что токсичность метанола не имеет значения, потому что он менее токсичен, чем бензол. В отношении применения в топливе бензола, по крайней мере в США, приняты очень строгие ограничения вследствие того, что он обладает очень высокой токсичностью. Я хотел бы знать, каким образом относятся к этим ограничениям в Европе? Третий вопрос касается Вашего комментария относительно того, что по стоимости метанол может конкурировать с бензином. Если этот вопрос рассматривать с точки зрения стоимости единицы энергии в США, то это, конечно, не так. Опять мне хочется спросить, по-другому ли на данный вопрос смотрят в Европе?

Берихардт. Вы правы, содержание НС в отработавших газах при холодном запуске двигателя на метаноле больше. Согласно нашим наблюдениям, в течение первых 200 с подготовка и распределение смеси происходят плохо. Нам пришлось усовершенствовать систему распыления и модифицировать карбюраторы с целью улучшения подготовки смеси. Для решения этих проблем мы пользовались системой впрыска топлива или системами, подобными Дрессораторам. Если Вы посмотрите на диаграмму содержания загрязнений в отработавших газах, полученную во время проводившихся испытаний, то увидите, что для испарения метанола во впускном коллекторе требуется 200 с. Это очень большой период времени. Нельзя будет удовлетворить требованиям стандартов без решения этой проблемы, над которой еще следует поработать,

Теперь относительно второго вопроса. В Европе очень много дискутируют о токсичности метанола. Пока неясно, что хуже — метанол или бензин. Нефтяные компании ФРГ недавно субсидировали работы по исследованию их токсических свойств под руководством профессора Гамбургского университета. Он пришел к такому же выводу, как и наши сотрудники, т. е. и к метанолу, и к бензину следует относиться как к одинаково токсичным веществам. При работе с метанолом необходимо соблюдать меры

предосторожности, так же, как и с бензином. Кроме того, в бензине содержание ароматических углеводородов может быть очень высоким.

Ваш третий вопрос касается стоимости. Вы правы. В настоящее время метанол стоит дороже бензина. Но мы смотрим вперед, может быть, на 20 лет или что-нибудь в этом роде. В перспективе метанол можно будет получать из природного газа месторождений Северного моря. Это самый дешевый способ получения метанола. Другим первичным источником для производства метанола может служить уголь. Этот способ производства несколько дороже. В исследованиях, посвященных метанолу и технологии его производства, которые проводились в ФРГ, принимали участие 15 институтов, придерживавшихся различного мнения относительно метанола и технологии его производства. В результате проведенной работы пришли к выводу, что по крайней мере в период, когда мы испытываем энергетический кризис, стоимость метанола сравнима со стоимостью бензина. Так, например, цена, которую нам приходилось платить за бензин в Амстердаме во время эмбарго арабских стран на нефть, была выше, чем цена на синтетический метанол.

СГОРАНИЕ МЕТАНОЛА В АВТОМОБИЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЕ

Л. У. ХЬЮЭЛЬМАНТЕЛЬ, С. Дж. ЛИДДЛ, Д. К. ХЭММОНД
Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»,
Уоррен, штат Мичиган, США

С целью оценки метанола в качестве топлива для газовых турбин были проведены теоретические и экспериментальные исследования на экспериментальном газотурбинном двигателе СТ-225 для легкового автомобиля. Термодинамический анализ показал, что характеристика двигателя при работе на метаноле не должна значительно отличаться от характеристики при работе на керосине. После необходимого переоборудования топливоподающей системы для работы на метаноле были проведены стендовые испытания двигателя, подтвердившие, что характеристики работы двигателя на метаноле и на керосине идентичны. При работе на метаноле в двигателе с обычной камерой на диффузионном пламени содержание окислов азота в отработавших газах снижалось примерно на 70% для всех условий, окиси углерода по сравнению с нормальной работой двигателя на керосине — на 25%, а при повышенных нагрузках и работе на метаноле увеличивалось на 165%. Содержание в отработавших газах НС и альдегидов было низким для обоих топлив, но при работе двигателя на метаноле несколько больше. Испытания двигателя, установленного на стенде для измерения крутящего момента, которые были проведены согласно программе федерального метода испытания загрязнения окружающей среды отработавшими газами 1975 г. и программе экономии топлива при автомобильных перевозках 1975 г., подтвердили, что расход метанола был примерно таким же, как и керосина. При небольшой наработке для обоих топлив вполне удовлетворялись требования федерального стандарта 1978 г. на содержание НС и СО в отработавших газах (0,25 г/км и 2,1 г/км), а при работе двигателя на метаноле удовлетворялись также и требования Калифорнийского стандарта 1977 г. на содержание в отработавших газах окислов азота (0,93 г/км). Не предпринималось

никаких попыток для определения факторов, влияющих на увеличение содержания загрязнений в отработавших газах. Условия вождения при работе на метаноле были во всяком случае не хуже, чем на керосине.

Введение В связи с прогнозируемым истощением ресурсов нефти страны, а также неопределенностью возможности импорта зарубежной нефти и ее дороговизной возникла необходимость в интенсивных поисках подходящих нефтяных автомобильных топлив. Одним из таких топлив, которое привлекло к себе внимание, является метанол. Он особенно привлекателен тем, что может получаться в промышленных масштабах из угля и что при нормальных температуре и давлении находится в жидком состоянии. Некоторые другие возможные топлива, предлагавшиеся в качестве автомобильных, как, например, водород и аммиак, должны храниться при высоком давлении или при криогенной температуре. Значительным недостатком метанола является его низкая теплота сгорания — всего 20 млн Дж/кг по сравнению с 43,2 млн Дж/кг для керосина. В табл. 1 приводится сравнение некоторых физических и термодинамических свойств метанола и керосина.

Для оценки метанола в качестве топлива к газотурбинным двигателям были проведены теоретические и экспериментальные исследования на экспериментальном регенеративном двигателе GT-225 для легковых автомобилей. Выбор газовой турбины для сжигания необычного топлива вполне логичен, так как этот двигатель может эксплуатироваться на различных топливах. В данной статье представлены результаты проведенной исследовательской работы.

Теоретическое исследование Каким будет влияние метанола на характеристику газотурбинного двигателя GT-225, если допустить, что в системе подачи топлива произведены необходимые изменения для работы на метаноле, а все остальное оставлено таким, каким оно должно быть для работы на керосине? Чтобы ответить на этот вопрос, были проведены на математической модели теоретические исследования для частично нагруженного

Таблица 1¹ Свойства метанола и керосина

Параметр	Метанол	Керосин ¹
Химическая формула	CH ₃ OH	C ₁₂ H ₂₂
Молекулярная масса	32,04	166
Удельный вес при 289 К	0,793	0,808
Низшая теплота сгорания жидкости, МДж/кг	20,0	43,2
Теплота парообразования, МДж/кг	1,172	0,326
Температура кипения при 1 атм, К	338	442—562
Массное отношение воздух—топливо	6,48	14,47

¹ Свойства керосина, поскольку он представляет собой смесь различных углеводородов, не являются неизменными, а колеблются в значительной степени. Показатели, приводимые в таблице, взяты из различных источников.

газотурбинного двигателя и определены характеристики двигателя при работе на метаноле и керосине.

На первом этапе были рассчитаны характеристики отработавшего газа, которые служили исходными данными для составления программы моделирования двигателя. Предполагалось, что метанол при избытке воздуха сгорал полностью, 1% аргона, содержащегося в воздухе, рассматривался как азот. Результаты этих расчетов для керосина и метанола приведены на рис. 1, на котором отношение удельных теплоемкостей газов показано в зависимости от эквивалентного отношения топлива и воздуха в рабочей смеси и температуры на входе в камеру сгорания. Промышленный метанол содержит от одного до трех процентов воды, но при расчетах она не учитывалась.

Единственными изменениями, которые были включены в программу расчета частично нагруженного двигателя, являлись изменения, касающиеся расчета отношений топливно-воздушной смеси и удельных теплоемкостей отработавшего газа. Влияние характеристик различных механизмов двигателя на топливо не учитывалось. Были сделаны и приняты два дополнительных предположения. Первое из них состояло в том, что смена топлива не оказывает влияния на теплопроводность газа, т.е. регенератор работает одинаково на метаноле и на керосине. Второе допущение заключалось в том, что снижение давления в системе сгорания не зависит от изменения топлива. Поскольку большая часть отработавших газов представляет собой избыточный воздух, эти допущения вполне логичны и могут внести лишь небольшую ошибку.

В программе исследования — три независимых переменных: скорость газовой турбины, мощность турбины и производительность форсунки, поскольку в двигателе GT-225 производительность форсунок может быть различной. Среди важных переменных также снимаемая мощность, температура на входе в газовую турбину, температура на входе в горячую часть регенератора и термический коэффициент полезного действия. Предельные возможности материала турбины и регенератора, а также вибрация, обус-

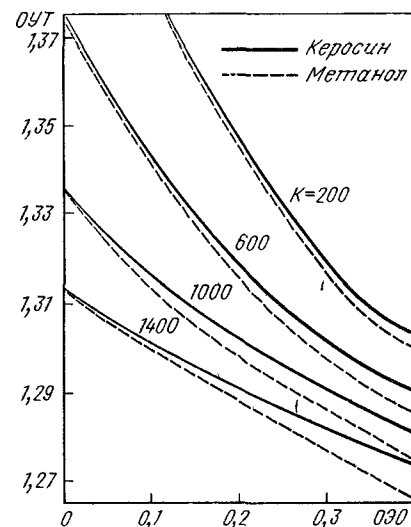


Рис. 1 Отношение удельных теплоемкостей (OYT) при работе двигателя на керосине и метаноле в зависимости от общего эквивалентного отношения (OEO) компонентов в горючей смеси при различной температуре на входе в камеру сгорания.

ловленная компрессором, ограничивают возможность применения в силовых турбинах форсунок с производительностью, которая могла бы быть использована для конкретной скорости газообразования. Данной скорости газообразования и работе форсунок соответствует скорость силовой турбины, при которой достигается максимальная мощность. Результаты проведенных исследований могут быть обобщены в следующем виде:

1. При данной скорости газообразования и производительности форсунки снимаемая мощность двигателя почти не зависит от используемого топлива, а его термический к. п. д. при работе на метаноле ниже, чем при работе на керосине. Эти расчетные потери термического к. п. д. составляют примерно от 0,4% при 50%-ной скорости газообразования до 1,0% при 100%-ной скорости газообразования.

2. При данной скорости газообразования и производительности форсунки температура на входе в газовую турбину при работе двигателя на метаноле ниже, чем при работе на керосине. Расчетная разница колеблется в пределах от 8 К при низкой скорости газообразования до 22 К при расчетном режиме работы двигателя. Заниженная температура является причиной более низкого к. п. д. при работе на метаноле.

3. При данной скорости газообразования и температуре на входе в турбину снимаемая мощность при работе двигателя на метаноле больше, чем при работе на керосине. Максимальное увеличение мощности при работе на метаноле достигает примерно 5% при 100%-ной скорости газообразования. Расход воздуха при определенной производительности форсунки практически не зависит от типа топлива; во всем диапазоне скоростей расход воздуха при работе двигателя на метаноле на 0,03% меньше, чем при работе на керосине. Поэтому мощность, требующаяся для привода компрессора, остается неизменной. Поскольку расход топлива при работе двигателя на метаноле значительно выше, чем при работе на керосине, увеличивается расход топлива через газовую турбину, приводящую компрессор. Мощность, создаваемая газовой турбиной, пропорциональна расходу проходящего топлива и его температуре на входе. В связи с тем, что расход топлива возрастает, температура на входе, как было указано выше, снижается. Аналогичное явление происходит и в силовой турбине. Впускная температура в силовой турбине падает в такой же степени, как и в газовой турбине. Термический к. п. д. в большой степени зависит от температуры, поэтому снижение температуры должно вести к падению термического к. п. д.

На рис. 2 приводятся некоторые результаты проведенных исследований. Расход энергии при испытании двигателя на стенде показан для обоих топлив в зависимости от полезной мощности двигателя при различных скоростях газообразования. Он представляет собой отношение расхода поступающей тепловой энергии (расход топлива, умноженный на его теплоту сгорания) к полезной мощности двигателя и обратно пропорционален термическо-

му к. п. д. Вообще говоря, расход топлива при испытании двигателя на стенде используется при определении топливной экономичности. Однако в связи с очень большой разницей между теплотой сгорания метанола и керосина расход топлива при стендовых испытаниях не может непосредственно сравниваться с фактическим расходом энергии. Расчетные показатели, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что при данной полезной мощности расход энергии при работе на метаноле больше (что объясняется меньшим термическим к. п. д.), чем при работе на керосине на всех скоростях газообразования. Разница составляет примерно 5%.

Экспериментальное оборудование. Система контрольно-измерительных приборов на двигателе. Для проведения этих сравнительных исследований использовался экспериментальный газотурбинный двигатель GMR-GT-225 [1] для легкового автомобиля. GT-225 представляет собой двухконтурный регенеративный двигатель с форсунками различной производительности и контролем температуры на входе в турбину. Расчетная мощность этого двигателя 168 кВт при частоте вращения турбины 44 000 об/мин и температурой на впуске 1283 К. Для регулирования расхода топлива, пропускаемого через форсунки в камеру сгорания, используется электронная система, включающая регулятор давления, с помощью которого устанавливается скорость газообразования в зависимости от установки дроссельной заслонки. Система регулирования автоматически устанавливает положение форсунок силовой турбины таким образом, чтобы температура на входе в турбину, зависящая от положения дроссельной заслонки и скорости газообразования, изменялась по заданной программе. Двигатель с выключенной системой регулирования может эксплуатироваться при фиксированном положении форсунок.

Камера сгорания. Для испытания обоих топлив в течение всей программы испытаний использовалась одна и та же камера

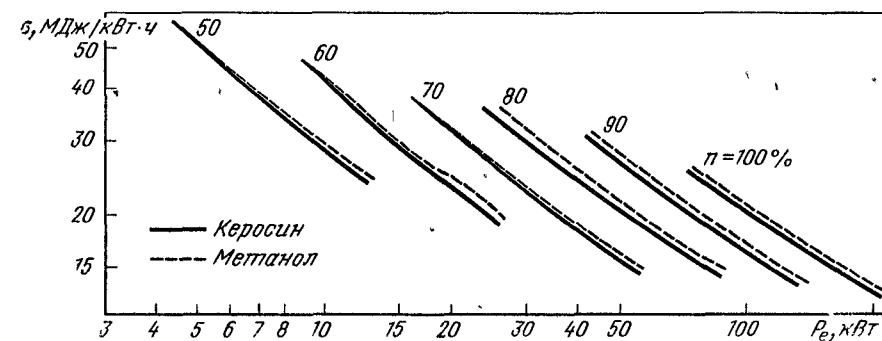


Рис. 2. Удельный расход энергии (ϵ) в зависимости от мощности двигателя для различной относительной частоты вращения n

сгорания, которая представляет собой обычную камеру сгорания с диффузионным пламенем. Для прохода воздуха в камеру через внутреннюю облицовку имеются отверстие для вихревой форсунки, кольцевые прорезы для пленочного охлаждения между вихревой форсункой и жаровой трубой, ряд первичных отверстий для вставных втулок и ряд воздушных отверстий.

Изменения в топливной системе, необходимые для работы двигателя на метаноле. Поскольку некоторые свойства метанола значительно отличаются от свойств керосина, для того, чтобы двигатель GT-225 можно было эксплуатировать на метаноле, в его топливную систему пришлось внести соответствующие изменения. Были расширены каналы форсунок, чтобы через них могло проходить необходимое количество топлива без превышения допустимого давления, при помощи которого регулируют подачу топлива (в топливной форсунке двигателя GT-225 для обеспечения лучшего распыления топлива используется воздух).

Кроме того, обычный шестеренчатый насос высокого давления был заменен экспериментальным аксиально-поршневым насосом. Диафрагма в топливном клапане была заменена на другую, изготовленную из материала, совместимого с метанолом.

Аксиально-поршневой насос и модифицированная диафрагма использовались при испытаниях двигателя как на метаноле, так и на керосине.

За исключением некоторых испытаний, в которых определялось влияние давления распыляющего воздуха на содержание в отработавших газах загрязнений, форсунка с расширенными каналами использовалась только при работе двигателя на метаноле, в то время как при работе двигателя на керосине применялась обычная топливная форсунка.

Автомобиль. Испытания автомобиля проводились на специальном шасси с устройством для измерения момента. Передний тонкий листовой металл кузова был удален, и рама изменена таким образом, что можно было смонтировать двигатель. Такая компоновка обеспечивает свободный доступ к двигателю во время испытаний для наблюдения и регулирования. Кроме этого, было снято переднее сиденье легкового автомобиля для того, чтобы иметь возможность разместить дополнительные приборы и электронную систему регулирования. На стенде во время испытаний использовался трехступенчатый преобразователь крутящего момента со сменным статором. Передаточное число заднего моста было равно 3,9.

Приборы. Содержание HC, CO, CO₂ и NO_x при испытаниях двигателя на стенде и на шасси автомобиля определялось с помощью по существу идентичных приборов. Ниже приводятся краткие характеристики использовавшихся приборов и полученные результаты.

Для определения содержания углеводородов использовался прибор Бекман 402 с подогреваемым детектором пламенной иони-

зации, показывающий концентрации 5000, 1000, 500, 100, 50, 10, 5, 1 объемных частей на миллион в виде C₆.

Для определения содержания окиси углерода использовался прибор Бекман 315 BNDIR, показывающий концентрации 600, 200, 100 объемных частей на миллион.

Содержание двуокиси углерода определялось с помощью прибора Бекман 315 BNDIR, показывающего концентрации 5, 2, 1% по объему.

Содержание NO_x, определялось на хемилюминесцентном приборе Термо Электрон 10А, показывающем концентрации 10000, 2500, 1000, 250, 100, 25, 10, 2,5 объемных частей на миллион в виде NO.

Образцы газов для всех приборов NDIR предварительно пропускались через охлаждаемые ловушки и фильтры. На содержание NO_x газ пропусклся только через фильтры. В приборы для определения содержания HC подавались образцы газа, температура которых поддерживалась равной 450 K.

Для измерения фоновой концентрации углеводородов во время испытаний на шасси автомобиля использовался неподогреваемый детектор диффузионного пламени Бекман 400, показывающий концентрации 1000, 100, 10, 1 объемных частей на миллион в виде C₆. Образец газа, поступающего в этот прибор, пропусклся предварительно через охлаждаемые ловушку и фильтр.

Концентрация альдегидов в отработавших газах измерялась во время установившегося режима работы методом использования 3-метил-2-бензотиазолон гидразона, описанным Савицким и сотрудниками [2]. Оборудование для этих измерений показано на рис. 3. После первого опорожнения резервуара при помощи вакуумного насоса слегка открывали измерительный клапан и через три последовательно установленные поглотительные емкости в бак подавались отработавшие газы. В поглотительных емкостях содержался водный раствор 3-метил-2-бензотиазолон-гидрозола, с помощью которого из отработавших газов извлекались растворимые в воде алифатические альдегиды. Использование трех поглотительных емкостей объясняется необходимостью удаления в основном всех альдегидов. Объем отбираемых проб отработавших газов вычислялся по вместимости бака с учетом температуры и давления в нем до и после отбора пробы. Таким образом, определялось среднее содержание альдегидов в отработавших газах.

В связи с тем, что концентрация альдегидов в отработавших газах газотурбинного двигателя GT-225 была очень небольшой (менее одной объемной части на миллион), необходимо было отбирать пробы в больших количествах. Для обеспечения полного удаления альдегидов в поглотительных емкостях скорость отбора проб вынуждены были ограничить 500 мл/мин. Поэтому отбор проб продолжался около одного часа. Из-за этих трудностей оказалось невозможным использование данного метода для непрерывных измерений во время работы в установившемся

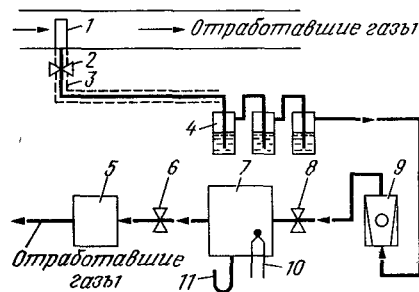


Рис. 3. Схема системы для определения содержания альдегидов:

1 — гребенка для отбора пробы газа; 2, 6 — отсеочный клапан; 3 — нагреваемый трубопровод, 400 К; 4 — поглотитель; 5 — вакуумный насос; 7 — емкость 20,3 л; 8 — измерительный клапан; 9 — расходомер; 10 — термомпара; 11 — манометр

режиме. Данная методика, кроме того, не дает сходимых результатов с измерением загрязнений в отработавших газах топливным методом, использованным при испытаниях двигателя GT-225 на шасси. В связи с тем, что для определения концентрации загрязнений в отработавших газах не использовался пробоотборник постоянного объема, скорость отбора проб приходилось менять пропорционально расходу отработавших газов, проходивших через прибор федерального метода испытаний.

Во время этих исследований использовались различные ме-

тоды измерения расхода топлива. При испытаниях двигателя на стенде во время работы на керосине использовалась система испытательной камеры с бюреткой. Это автоматизированная, точная система, которая позволяет измерять время, требующееся двигателю для расходования известного объема топлива, содержащегося в бюретке. По температуре рассчитывалась фактическая плотность топлива. Для того чтобы не допустить порчу системы из-за ее несовместимости с метанолом, во время испытаний на метаноле она не использовалась. Вместо нее для определения среднего расхода топлива в каждом испытании при работе двигателя на метаноле через определенные интервалы времени применялись точные платформенные весы и секундомер. Для обеспечения точности измерения расхода топлива при каждом испытании замеры проводились в течение достаточно продолжительного времени.

При установившемся режиме и работе двигателя на керосине во время испытаний на шасси использовался цифровой топливный измеритель Граунд модел 5А. Этот прибор представляет собой счетчик, с помощью которого можно непосредственно отсчитывать объем расходующего топлива, его температуру и время. Для измерения расхода метанола при установившемся режиме испытаний на шасси с целью предотвращения порчи этого счетчика из-за его несовместимости с метанолом использовалась система с платформенными весами и секундомером. Во время Федеральных испытаний по экономии топлива платформенные весы применялись для измерения расхода обоих топлив.

По программе определения содержания загрязнений в отработавших газах для измерения расхода обоих топлив использовался бесподшипниковый расходомер модели E20 фирмы «Беринглесс флоуметер». Благодаря его малому размеру (примерно

5 мм в диаметре) и отсутствию в расходомере подшипников он отличается высокой чувствительностью к изменению расхода топлива. Полученные этим методом мгновенные расходы топлива были использованы для расчета количества загрязнений в отработавших газах [3] с целью получения данных в соответствии с федеральным методом испытаний, а также экономии топлива. Кроме того, во время Федеральных испытаний путем взвешивания по специальной методике проверялся общий расход топлив. Было достигнуто хорошее совпадение в определении расхода топлива с помощью расходомера и методом взвешивания.

Методика испытаний. Во время испытаний двигателя его мощность и содержание загрязнителей в отработавших газах определялись при установившемся режиме работы газовой турбины, начиная от 50%-ной (холостой ход) до 100%-ной (полная мощность) частоты вращения. Измерения производились при двух температурах на каждой частоте вращения газовой турбины, устанавливаемой регулированием работы форсунок. При этом наиболее высокой при каждой частоте вращения является приблизительно максимально допустимая температура для установившегося режима работы. При низких и промежуточных скоростях газообразования температура на впуске с горячей стороны регенератора ограничивается примерно 1000 К. На более высоких скоростях температура на выпуске в газовую турбину ограничивается примерно 1280 К. При каждой частоте вращения скорость выходного потока соответствовала максимальной мощности.

При определении характеристики двигателя во время каждого испытания определялись скорости газообразования и выходного потока, расходы топлива и воздуха, температура и давление в различных участках двигателя. Все полученные характеристики сравнивались со стандартными условиями впуска (288,2 К и 101,3 кПа). Содержание в отработавших газах углеводородов, окиси углерода и окислов азота измерялось по крайней мере при двух производительностях форсунок на каждой из шести от 50 до 100% расчетных скоростей. Все эти показатели снимались повторно. Содержание альдегидов в отработавших газах также определялось при тех же условиях. Оно не определялось только при 90 и 100% скорости газообразования, когда расход топлива был таким, что отбор пробы был нецелесообразен. Повторное определение концентрации альдегидов производилось лишь в отдельных случаях. Испытания обоих топлив проходили на всех скоростях газообразования в течение полудня поочередно без ожидания, пока перед сменой топлива будут завершены все испытания на одном топливе. Это делалось с той целью, чтобы устранить влияние небольшого колебания суточного давления на относительную характеристику двигателя при работе на двух различных топливах.

Испытания на шасси. На шасси проведено определение топливной экономичности и содержания загрязнений в отра-

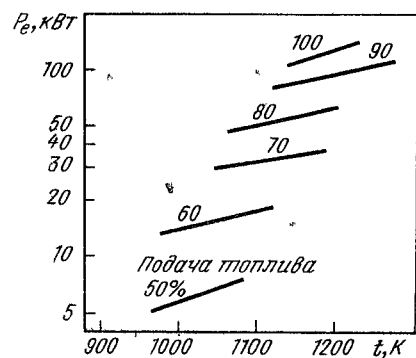


Рис 4 Зависимость мощности турбины (P_e) от температуры на входе при различной величине подачи топлива (при работе на керосине и метаноле различие незначительно и на рисунке не показано)

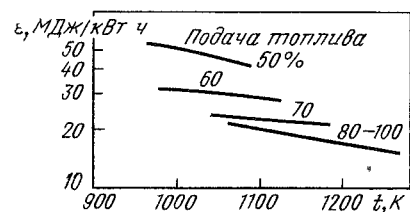


Рис 5 Зависимость расхода удельной энергии (ϵ) от температуры на входе в турбину при различной величине подачи топлива (при работе на керосине и метаноле различие незначительно и на рисунке не показано)

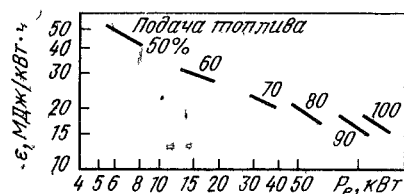


Рис 6 Зависимость расхода удельной энергии (ϵ) от выходной мощности (P_e) на валу при различной величине подачи топлива, постоянной частоте вращения, температуре на входе 288,2 К и давлении 101,3 кПа

ботавших газах при установившемся и переходном режимах работы Стенд был отрегулирован на 9,3 кВт при 80 км/ч и 2270 кг эквивалентной инерционной массы Во время всех испытаний на шасси использовалось автоматическое регулирование работы форсунки турбины Были проведены следующие испытания на обоих топливах

1 Испытания на содержание загрязнений в отработавших газах

2 Федеральные испытания для определения топливной экономичности при автодорожных перевозках

3 Испытания для определения содержания загрязнений в отработавших газах и топливной экономичности при установившемся режиме

Испытания на установившемся режиме проводились при полностью прогревом двигателя и ходовой части Концентрация загрязнений в отработавших газах, расход топлива, частота вращения двигателя и температура в отдельных его частях определялись при различных фиксированных скоростях от 20 до 96 км/ч На скоростях более высоких чем 96 км/ч испытания не проводились из-за ограниченных возможностей стенда

Результаты испытаний На рис 4 показаны зависимости потребляемой мощности от уровня газообразования, температуры впуска и чисел оборотов газовой турбины (здесь мы говорим о характеристике двигателя при его работе в установившемся режиме) Как видим, при данных температуре впуска газа в турбину и частоте вращения мощность

двигателя GT-225 при работе на метаноле больше, чем при работе на керосине Увеличение мощности при работе двигателя на метаноле изменяется от 0 при 50%-ной скорости и почти до 8% при 100%-ной скорости газообразования На всех скоростях, отличных от 100%, различие в мощности при работе на обоих топливах имеет тенденцию к уменьшению по мере увеличения температуры впуска в турбину

На рис 5 приводятся сравнение расходов удельной энергии при испытании двигателя на стенде для обоих топлив при шести скоростях газообразования в зависимости от температуры на впуске в турбину Приведенные результаты свидетельствуют о небольшой разнице в расходе энергии при испытании двигателя на стенде на обоих топливах при данной температуре газа на входе в турбину В большинстве случаев наблюдается тенденция несколько меньших расходов энергии при испытаниях на керосине, чем при работе на метаноле, при высоких температурах и определенных скоростях газообразования При низких температурах для данной скорости незначительное преимущество керосина исчезает и в большинстве случаев проявляется преимущество работы на метаноле Такая тенденция находится в согласии с относительными изменениями снимаемой мощности и температуры на входе в турбину для обоих топлив и определенных чисел оборотов При 100%-ных оборотах на метаноле получают несколько более низкие расходы энергии во всем диапазоне температур Как было сказано выше, при получении этих данных регулирование производительности форсунок силовой турбины для изменения температуры на входе в турбину осуществлялось вручную Во время нормальной работы двигателя применялось автоматическое регулирование форсунки и в результате на входе в турбину температура приближалась к наибольшим значениям из показанных на кривых Эти результаты свидетельствуют о том, что при нормальных условиях эксплуатации двигателя GT-225 на постоянной частоте вращения (отличной от 100%) при работе на керосине КПД несколько выше, чем при работе на метаноле

В то же время в большинстве случаев разница между двумя топливами невелика, она находится в пределах точности проведенных экспериментов

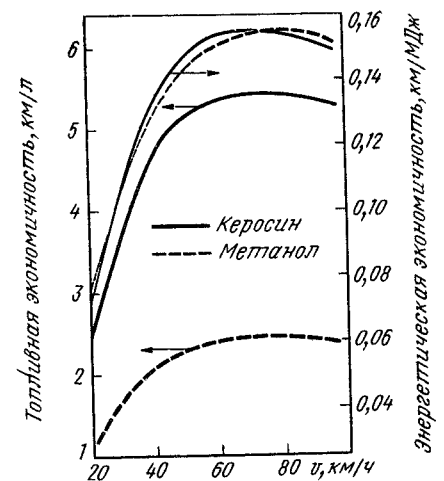


Рис 7 Зависимость топливной и энергетической экономичности от скорости, полученная при стендовых испытаниях двигателя

На рис. 6 приводятся сравнения характеристики газотурбинного двигателя GT-225 при работе на метаноле и керосине в других условиях. Эти условия аналогичны приведенным на рис. 2. На рис. 6 сравниваются расходы энергии при испытании двигателя на стенде в зависимости от полезной мощности на шести различных частотах вращения, при которых проводились испытания. Правый конец каждой пары кривых соответствует условиям при наибольшей температуре для данной частоты вращения. Эти результаты говорят о том, что расход метанола больше расхода керосина. Максимальная разница в расходе энергии при испытании двигателя на стенде равна примерно 3%.

На рис. 7 приводятся результаты испытаний, полученные на стенде для шасси при постоянной частоте вращения. На этом рисунке топливная экономичность (скорректированная для 289 К) и энергетическая экономичность приводятся для обоих топлив в зависимости от скорости автомобиля. В течение всех этих испытаний действовала автоматическая система регулирования форсунки. Согласно полученным результатам, топливная экономичность при работе двигателя на метаноле примерно на 55% меньше, чем при работе на керосине во всем диапазоне испытаний. Такая большая разница объясняется главным образом различием в теплотворной способности этих топлив. Однако при расчете на единицу энергии эта разница значительно меньше. На основании полученных данных можно сделать вывод, что при работе газотурбинного двигателя GT-225 на керосине к п. д. на всех скоростях, при которых проводились испытания, лишь незначительно (1—3%) больше, чем при работе на метаноле. Эти результаты хорошо согласуются с ранее приведенными данными.

Характеристика двигателя на переходных режимах эксплуатации. Наряду с испытаниями при постоянной скорости определялась топливная экономичность для обоих топлив при эксплуатации автомобиля по программам Федерального метода испытаний 1975 г. и Федерального метода испытаний на топливную экономичность (табл. 2).

Данные табл. 2 также свидетельствуют о небольшой разнице в топливной экономичности при работе двигателя на этих топливах при условии оценки на единицу израсходованной энергии. Разница в показателях, полученная при работе на каждом из топлив, находится в пределах экспериментальной точности

Таблица 2. Сравнение топливной экономичности при работе в переходном режиме

Метод испытания	Керосин		Метанол	
	км/л	км/кДж	км/л	км/кДж
Федеральный метод испытания 1975 г.	2,77	0,079	1,22	0,077
Федеральный метод испытания на топливную экономичность	5,19	0,149	2,38	0,150

испытаний. Средняя скорость при проведении испытаний на топливную экономичность по федеральному методу была равна 78 км/ч. Экономия топлива и энергии, определенная для обоих топлив во время этого испытания, несколько ниже данных, приведенных на рис. 11 для испытаний при постоянной скорости 78 км/ч. Эта разница ожидалась вследствие переходного характера Федерального метода оценки топливной экономичности.

Двигатель на метаноле запускался так же, как и на керосине. Согласно анализу данных, полученных при испытаниях ходовой части, характеристика работы двигателя на неустановившемся режиме во всяком случае не уступала характеристике работы на керосине.

Содержание загрязнений в отработавших газах при работе на постоянной скорости. Наибольший объем работ для определения содержания загрязнений в отработавших газах был выполнен при испытаниях двигателя в режиме постоянной скорости. Из предыдущих работ было известно, что на содержание окиси углерода в отработавших газах при работе двигателя на метаноле значительно влияет снижение давления поступающего воздуха. Это влияние, а также влияние давления поступающего воздуха на содержание в отработавших газах окислов азота показано на рис. 8. Влияние давления воздуха на содержание в отработавших газах углеводородов было незначительным.

Из рис. 8 можно видеть, что при падении давления поступающего воздуха на 69 кПа при работе двигателя на керосине со стандартной форсункой получалось приемлемое содержание загрязнений в отработавших газах, и поэтому исследования проводились при таком давлении. Полученные данные свидетельствуют также о снижении концентрации окиси углерода в отработавших газах при работе с модифицированной форсункой (с расширенными каналами для топлива) при таком же падении давления. При работе на любых форсунках с метанолом для снижения содержания окиси углерода в отработавших газах требовался больший перепад давления поступающего воздуха и на модифицированной форсунке получались более благоприятные результаты. К счастью, содержание окислов азота в отработавших газах

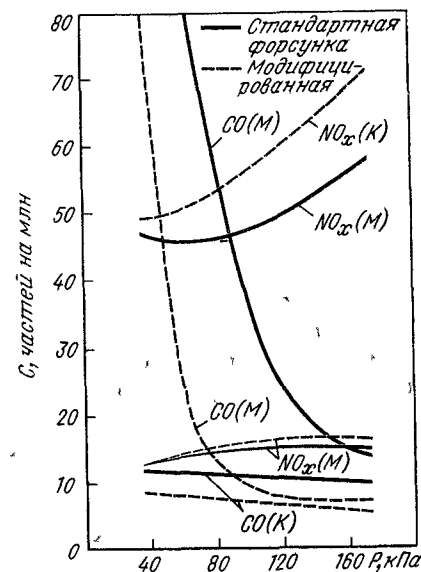


Рис 8 Объемная концентрация (C) загрязнителей в зависимости от давления на входе (P) при работе двигателя на керосине (K) и метаноле (M)

лишь незначительно зависело от перепада давления воздуха при работе двигателя на метаноле. Поэтому при работе на метаноле использовалась модифицированная форсунка с перепадом давления поступающего воздуха в 138 и 172 кПа. При этом достигалось значительное снижение концентрации окиси углерода в отработавших газах. Без ограничения содержания окиси углерода путем изменения перепада давления воздуха его концентрация в отработавших газах была бы значительно выше. Согласно работам других исследователей [4, 5], содержание окиси углерода в отработавших газах при работе на метаноле было больше, чем при работе на котельном топливе № 2. Во всех случаях использовались одноканальные форсунки и не использовалась дополнительная система ограничения содержания окиси углерода в отработавших газах с помощью форсунки с воздушным ускорителем.

Все результаты определения содержания окиси углерода в отработавших газах регистрировались в единицах массы, приходящихся на единицу энергии в топливе. Этот параметр был назван «удельной эмиссией на единицу энергии» (УЭЭ). Он представляет собой обычный индекс содержания окиси углерода в отработавших газах, разделенный на теплоту сгорания при сжигаемом топливе. Преимуществом этого параметра является то, что удельная эмиссия на единицу энергии может быть использована для непосредственного сравнения силовых установок и топлив.

Содержание окиси углерода в отработавших газах представлено на рис. 9, а при 50 и 60%-ном газообразовании. На метаноле образуется несколько меньше окиси углерода, чем при работе двигателя на керосине.

При определенном перепаде давления поступающего воздуха топливная форсунка не работает одинаково хорошо при более высоких расходах метанола (большие количества газа) и в результате образуется больше окиси углерода.

Концентрация окислов азота в отработавших газах при работе газотурбинного двигателя на метаноле примерно на 65—70% ниже, чем при работе на керосине. Результаты этих испытаний приводятся на рис. 9, б. Снижение содержания в отработавших газах окислов азота на метаноле объясняется главным образом низкой температурой горения метанола. Причиной снижения концентрации окислов азота в отработавших газах могут частично также служить увеличение скорости гашения пламени и снижение концентрации в зоне сгорания азота и кислорода, как это объяснено в работе Ла Пуанта и Шульца [5].

Содержание НС в отработавших газах (при всех условиях работы) газотурбинного двигателя GT 225 невелико (менее 0,5 объемных частей на миллион в виде C_6). Результаты этих испытаний приводятся на рис. 10. Причиной больших колебаний в оценке этих показателей является неточность измерения при таких низких концентрациях. Сходимость результатов определения концентрации

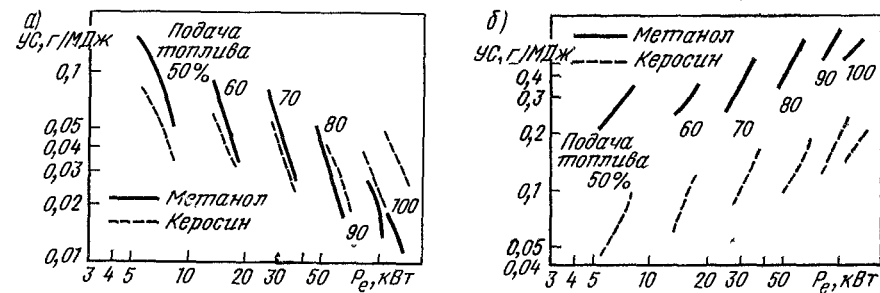


Рис. 9 Удельное содержание (УС) СО (а) и NO_x (б) в отработавших газах двигателя GT 235 в зависимости от мощности на валу (P_e) при постоянной частоте вращения вала и различной величине подачи топлива: керосино-воздушной смеси при давлении 69 кПа и метанола-воздушной смеси при 136 и 172 кПа

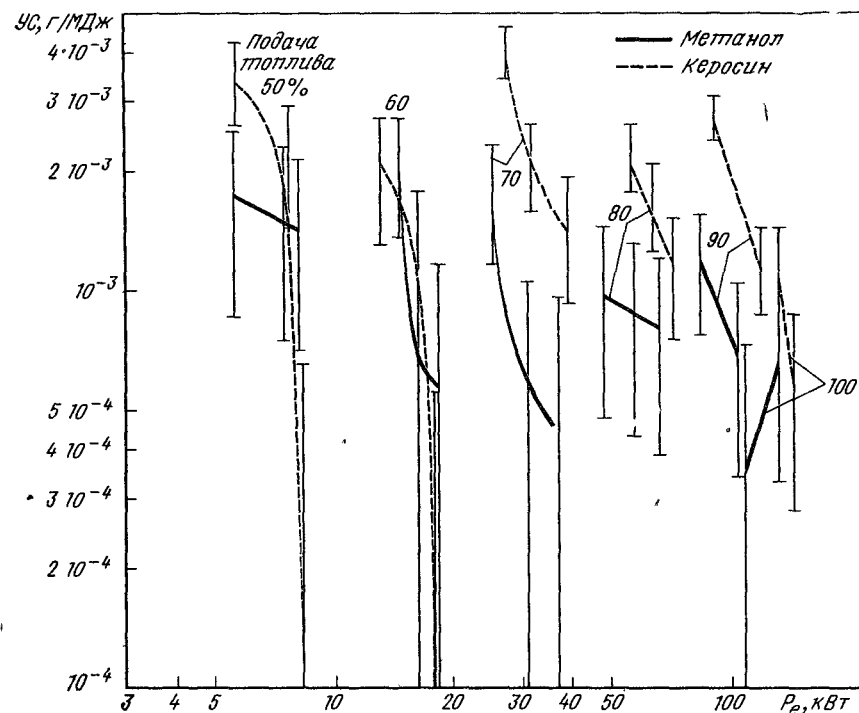


Рис. 10 Удельное содержание (УС) углеводородов НС в отработавших газах двигателя GT 225 в зависимости от мощности на валу (P_e) при постоянной частоте вращения и различной величине подачи топлива: керосино-воздушной смеси при давлении 69 кПа и метанола-воздушной смеси при 138 кПа

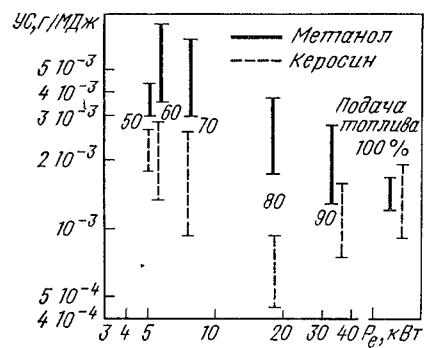


Рис 11 Удельное содержание (УС) альдегидов в отработавших газах двигателя GT 225 в зависимости от мощности на валу (P_e) при постоянной частоте вращения и различной величине подачи топлива керосино-воздушной смеси при давлении 69 кПа и метанолю-воздушной смеси при 138 кПа

состава отработавших газов могут быть занижены до 30%

При работе двигателя на метаноле концентрация углеводородов в отработавших газах выше, чем при работе на керосине. Предполагается, что причиной накопления углеводородных загрязнений в отработавших газах является главным образом гашение пламени с помощью пленочного охлаждения и первичного воздуха. В связи с тем, что при одинаковых условиях расход метанола в 2 раза больше расхода керосина, концентрация несгоревших компонентов в любых газах после гашения пламени будет выше. Поэтому предполагается, что и концентрация углеводородов в отработавших газах при работе газотурбинного двигателя на метаноле будет выше.

Содержание в отработавших газах альдегидов (показанных в виде формальдегида НСНО) при работе газотурбинного двигателя на метаноле выше, чем при работе на керосине. Результаты этих исследований приводятся на рис 11. Большой разброс результатов испытаний может быть объяснен необходимостью производить измерения очень низких концентраций (менее одной объемной части на миллион НСНО), нестабильностью работы двигателя в период отбора проб и различной абсорбционной способностью компонентов выходящих отработавших газов.

Более высокое содержание альдегидов в отработавших газах при работе газотурбинного двигателя на метаноле является результатом образования формальдегидов в качестве продукта окисления метанола [6]. В любых газах в результате гашения пламени в камере сгорания, очевидно, образуется более высокая концентрация формальдегида при работе двигателя на метаноле, чем на керосине.

углеводородов в отработавших газах хуже, чем сходимость результатов определения концентрации окиси углерода и окислов азота. Мы исходили из того, что чувствительность детектора пламенной ионизации к углеводородам, содержащимся в отработавших газах газотурбинного двигателя, после обоеих топлив одинакова. Чувствительность детектора пламенной ионизации к метанолю-азотным смесям составляет $80 \pm 10\%$ от чувствительности к соответствующим пропан-воздушным смесям. Поэтому показания концентрации углеводородов в отработавших газах при работе автомобильного двигателя на метаноле в зависимости от действительного

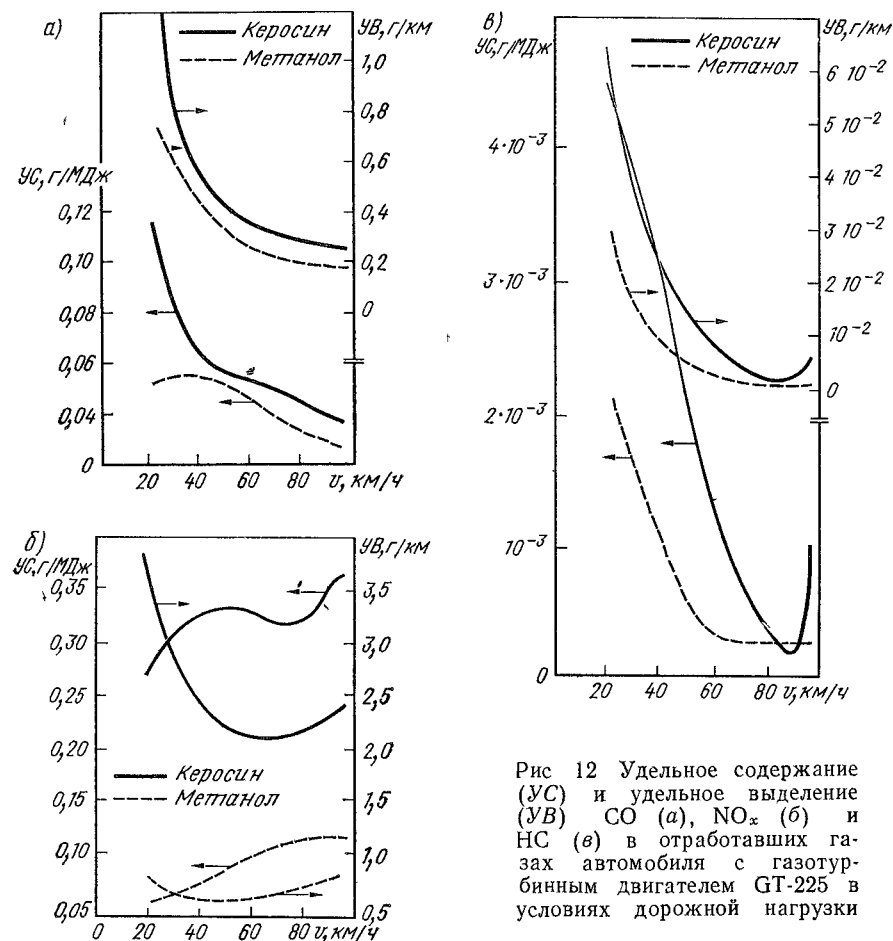


Рис 12 Удельное содержание (УС) и удельное выделение (УВ) CO (а), NO_x (б) и HC (в) в отработавших газах автомобиля с газотурбинным двигателем GT-225 в условиях дорожной нагрузки

Содержание в отработавших газах углеводородов, окиси углерода и окислов азота также определялось для постоянного режима и скоростей автомобиля от 20 до 96 км/ч. Результаты этих испытаний приводятся на рис. 12 в виде удельной эмиссии на единицу энергии и удельной эмиссии на единицу расстояния, т. е. массовое количество загрязнений, выброшенных в окружающую атмосферу, приходящееся на единицу пройденного пути. Во время этих испытаний содержание альдегидов в отработавших газах не определялось.

На всех скоростях, на которых производились оценки, при работе газотурбинного двигателя на метаноле в отработавших газах всегда оказывалось меньше окиси углерода, чем при работе на керосине (рис. 12, а). Для достижения указанных скоростей автомобиля требовалось 50—70%-ное газообразование от

расчетного. Согласно данным, полученным при стендовых испытаниях двигателя, удельная эмиссия на единицу энергии по окиси углерода при работе двигателя на метаноле с указанной нагрузкой ниже, а следовательно, ниже удельная эмиссия и при постоянной скорости автомобиля. Поскольку экономия энергии при эксплуатации автомобилей на обоих топливах отличается незначительно (см. рис. 7), то снижение содержания окиси углерода на единицу пройденного пути колебалось в незначительных пределах — от 10 до 36%.

При работе газотурбинного двигателя на метаноле в отработавших газах окислов азота образуется также меньше, чем при работе на керосине. Вследствие более низкой удельной эмиссии на единицу энергии, показанной на рис. 12, б, удельное содержание окислов азота на единицу расстояния снижается на 66—82%. Эти результаты согласуются с данными, полученными при стендовых испытаниях двигателя.

Содержание углеводородов в отработавших газах, как это показано на рис. 12, в, чрезвычайно мало. Концентрация углеводородов в отработавших газах всегда была ниже их концентрации в воздухе, который поступал в двигатель. Без учета углеводородов, содержащихся в воздухе, поступающем в двигатель, результаты, показанные на рис. 12, в, противоположны результатам, полученным при стендовых испытаниях двигателя, т. е. свидетельствуют о более низком содержании загрязнений при работе двигателя на метаноле, чем на керосине. Неточность и разброс данных, полученных при определении концентрации углеводородов в отработавших газах, являются результатом чрезвычайно низких уровней концентрации.

Содержание загрязнений в отработавших газах при работе двигателя на неустановившемся режиме. Для испытания на неустановившемся режиме были проведены стендовые испытания ходовой части автомобиля по программе Федерального метода испытаний 1975 г. Содержание загрязнений в отработавших газах, определенное во время этих испытаний, приводится в табл. 3.

При работе двигателя на обоих топливах содержание углеводородов и окиси углерода в отработавших газах было ниже, чем

Таблица 3. Федеральный метод определения загрязнений в отработавших газах 1975 г.

Топливо, стандарт	HC	CO	NO _x
GT-225, керосин	0,05	1,04	3,37
GT-225, метанол	0,08	0,73	0,91
Калифорнийский стандарт 1977 г.	0,25	5,6	0,93
Федеральный стандарт 1978 г.	0,25	2,1	0,25

Примечание. HC — в виде C₆H₁₄, NO_x — в виде NO₂.

требуют Калифорнийский стандарт 1977 г. и Федеральный стандарт 1978 г. При работе на метаноле содержание в отработавших газах окислов азота было ниже требований Калифорнийского стандарта 1977 г. По Федеральному стандарту 1978 г. при работе на метаноле концентрация углеводородов в отработавших газах была на 60% выше, окиси углерода на 30% ниже и окислов азота на 73% ниже, чем при работе на керосине. Снижение содержания окиси углерода и окислов азота в отработавших газах было примерно таким же, как и при испытаниях на постоянном режиме. Эксплуатация на неустановившемся режиме не оказывает существенного влияния на содержание загрязнений в отработавших газах. Во время большинства циклов испытаний в соответствии с требованиями федерального метода испытаний содержание углеводородов в отработавших газах при работе на метаноле было несколько выше, чем при работе на керосине. То же самое наблюдалось во время испытаний при установившемся режиме. Приведенные концентрации углеводородов в отработавших газах, определенные в соответствии с требованиями федерального метода испытаний, относятся в первую очередь к периоду низкотемпературного запуска и прогрева двигателя. Концентрации, наблюдавшиеся в эти периоды испытаний, были значительно выше, и поэтому загрязнения можно было определить более точно, чем концентрации, наблюдавшиеся при испытаниях на установившемся режиме. Более высокие концентрации углеводородов в отработавших газах при работе двигателя на метаноле являются, очевидно, следствием более высокой скрытой теплоты парообразования метанола (в 3 раза больше, чем у керосина, считая на массу), в результате чего во время низкотемпературного пуска снижается скорость испарения капель и соответственно улетучивается больше несгоревшего топлива.

Выводы

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что метанол пригоден для использования в качестве топлива в автомобильных газотурбинных двигателях. Его главным преимуществом по сравнению с обычным автомобильным газотурбинным топливом, как, например, керосином, является значительно меньшее содержание в отработавших газах окислов азота при всех условиях работы. При регулировании перепада давления поступающего в зону сгорания воздуха при работе двигателя в нормальном режиме содержание окиси углерода в отработавших газах при работе на метаноле было меньше, чем на керосине.

Однако при работе двигателя на метаноле при высокой мощности в отработавших газах содержалось больше окиси углерода, чем при работе на керосине. В то же время содержание в отработавших газах углеводородов и альдегидов после обоих топлив было незначительным.

Главным недостатком метанола является его низкая теплота сгорания, вследствие чего расход топлива при работе газотурбинного двигателя на метаноле при одинаковой мощности в 2,2 раза больше, чем при работе на керосине. В связи с этим возникает необходимость увеличения емкости агрегатов топливной системы, в том числе топливного насоса, и пропускной способности топливных коммуникаций, распределительных клапанов, топливных баков и форсунок. Должны быть также приняты меры предосторожности для предотвращения повреждения деталей агрегатов топливной системы, изготовленных из материалов, несовместимых с метанолом.

На основании теоретических исследований, при которых использованы ЭВМ с программами для частично нагруженного газотурбинного двигателя, с целью определения отдельных свойств отработавшего газа при работе на метаноле и на керосине для метанола было установлено небольшое преимущество по мощности при данных температуре на входе в турбину и частоте вращения газовой турбины. Было установлено также, что при работе двигателя на метаноле имеет место несколько более высокий расход энергии (из-за низкого термического к. п. д.).

Предсказанная согласно расчетам более высокая полезная мощность была подтверждена результатами испытаний. Во время испытаний на установившемся режиме при работе двигателя на метаноле наблюдался несколько более высокий расход энергии. При работе в неустановившемся режиме никакого различия не наблюдалось. Увеличение полезной мощности на метаноле объясняется большим массовым расходом газов, проходящих через турбину вследствие увеличенного расхода энергии. Несколько больший расход энергии при работе двигателя на метаноле с установившимся режимом вызван, очевидно, некоторым несоответствием для метанола конструкции элементов двигателя, рассчитанного на применение керосина.

Проведенные испытания показали также, что газотурбинный двигатель одинаково хорошо пускался как на керосине, так и на метаноле, хотя испытания по пуску двигателя при температуре ниже окружающей не проводились. Во время низкотемпературных испытаний было установлено, что в отработавших газах при работе двигателя на метаноле содержалось несколько больше углеводородов, чем при работе на керосине, что является следствием более высокой скрытой теплоты парообразования метанола. Способность автомобиля к движению, определенная во время испытаний на установившемся режиме была во всяком случае не хуже, чем при работе на керосине.

ОБСУЖДЕНИЕ

Дж. М. Колуччи (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). В США очень мало автомобилей с газотурбинными двигателями. Но известно, что значительное количество

газовых турбин используется на электростанциях для получения электроэнергии в пиковые периоды роста потребления. Могли бы Вы путем экстраполяции полученных Вами результатов сказать, может ли метанол служить хорошим топливом для такого рода газотурбинных установок?

Хьюэлмантиль. На некоторых установках для получения электроэнергии проводились испытания по применению в качестве топлива метанола. По-моему, такие испытания проводила фирма «Флорида пауэр энд лайт». На основании этих испытаний можно сказать, что метанол для электростанций является хорошим топливом. Во время проводившихся испытаний использовалась существующая топливная система, и поэтому из-за разницы в теплоте сгорания при данной системе можно было получить только около половины мощности. Во время этих испытаний топливная система не была модифицирована для увеличения ее пропускной способности. Тем не менее полученные результаты свидетельствуют о том, что метанол является для таких предприятий хорошим топливом.

Д. М. Тиг (Корпорация «Крайслер»). Как было отмечено в предыдущей работе, добавление воды к метанолу в значительной степени снижает содержание в отработавших газах окислов азота.

Такое же действие оказывает вода и при добавлении к метанолу при его использовании в качестве топлива для газовых турбин. Однако присутствие воды в топливе, скажем до 10%, существенно увеличивает проблемы, связанные с расслоением смеси и с коррозией различных деталей топливной системы как в двигателях с искровым зажиганием, так, и, надо полагать, в газотурбинных двигателях.

При использовании метанола в двигателях с искровым зажиганием добавление к метанолу легкокипящих углеводородов улучшает пусковые свойства топлива. Однако если к метанолу для снижения содержания окислов азота в отработавших газах будет добавлено около 10% воды, то возникает проблема стабильности трехкомпонентной топливной смеси. Таким образом, добавление воды к метанолу с целью снижения содержания в отработавших газах окислов азота весьма соблазнительно, но это связано с рядом новых проблем.

Е. Е. Спитлер (фирма «Шеврон рисёрч»). Учитывают ли методы измерения топливной экономичности, использовавшиеся во время испытаний в соответствии с требованиями федерального метода испытаний и определения характеристик двигателя при холостой работе на керосине, последние достижения техники для оценки работы газотурбинных двигателей?

Хьюэлмантиль. Я не думаю, что они учитывают самые последние достижения техники. Мне кажется, что мы все понимали, что существует ряд проблем, связанных с оценкой топливной экономичности газотурбинных двигателей, особенно при малых нагрузках. Имеются пути повышения топливной экономичности

газотурбинных двигателей, и они рассматривались. Наиболее вероятным путем повышения топливной экономичности газотурбинных двигателей является увеличение температуры газов перед турбиной, и мы так же, как и многие другие в нашей стране, изучаем этот вопрос.

Дж. П. Лонгвелл (фирма «МТИ энд Эксон») Возникали ли какие-либо проблемы при низкотемпературном запуске газотурбинных двигателей?

Хьюэлемантель Я не считаю, что при низкотемпературном запуске газотурбинных двигателей на метаноле могут возникнуть такие же трудности, как при низкотемпературном запуске поршневых двигателей. Мы пользовались во время испытаний распыляющей топливной форсункой, которая обеспечивала распыление топлива и образование мелкодисперсного тумана. Мне кажется, что такое тонкое распыление обеспечит легкое воспламенение горючей смеси и при низких температурах. Как известно, газотурбинный двигатель отличается способностью легкого запуска при низких температурах. Применение метанола может вызвать в этом отношении некоторые проблемы, но они не будут такими сложными, какими являются для поршневых двигателей. Дин, что Вы об этом думаете?

Д. К. Хэммонд (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс») Во время всех проводившихся нами испытаний мы не сталкивались с какой-либо проблемой низкотемпературного запуска. Основная проблема, которую нам приходилось решать, заключалась в предотвращении разрушения деталей топливной системы метанолом. Проблем, связанных с низкотемпературным запуском, не было. Наши испытания мы проводили в летний период времени, так что было довольно тепло. Я думаю, что при низкой температуре могут возникнуть трудности при запуске двигателя, но они не будут непреодолимыми, и я не думаю, что для их преодоления могут потребоваться какие-либо экзотические подогреватели или распылители.

М. Лориент (Министерство транспорта США) Встречались ли Вы с какими-либо проблемами коррозии двигателя или с проблемами использования пластмассовых трубопроводов?

Хьюэлемантель Мы обнаружили коррозию, но не в самом двигателе, а как об этом уже говорил Дин, в нашей топливной системе. Некоторые диафрагмы, использовавшиеся для регулирования подачи метанола, оказались несовместимыми с ним, и нам пришлось их заменить. Некоторая коррозия была обнаружена на отдельных деталях системы распределения топлива. По нашему мнению, метанол действует и на алюминиевые детали. Я думаю, что могут возникнуть проблемы коррозии и в топливном баке. Облицовка топливного бака может быть несовместима с метанолом. Во время проведения наших испытаний топливо в двигатель подавалось прямо из бочек, в которых метанол поступал к нам, поэтому нам не пришлось столкнуться с проблемами коррозии топливного бака. Кроме того, проблемы коррозии могут возникнуть

и в связи с присутствием в метаноле воды, которая может вызвать ржавление некоторых деталей.

С. Грач (фирма «Форд мотор») Не можете ли Вы сказать, каким был запах отработавших газов при запуске двигателя на метаноле таким же, как при запуске на керосине, лучше или хуже, чем при запуске на керосине?

Хэммонд Отработавшие газы при работе двигателя на метаноле на любых режимах не имели никакого запаха.

В. Дж. Мак Лин (Корнельский университет) Есть ли у Вас какие-либо соображения относительно того, что снижение NO_x полностью зависит от температуры в камере сгорания или от состава рабочей смеси для различных топлив?

Хьюэлемантель Я высказывал некоторые предположения относительно роли температуры адиабатного пламени при сгорании стехиометрической рабочей смеси керосина и метанола и снижения содержания окислов азота в отработавших газах исходя из температурной характеристики, изложенной в работе Де Суута, в которой указывалось, что на снижение за счет температуры приходится примерно 78%. Согласно нашим данным, эта доля составила 75%. Исходя из этого, я считаю, что состав рабочей смеси играет незначительную роль, а основную роль играет температура пламени.

НОВЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

У. М. СКОТТ

Фирма «Рикардо консалтинг энджинирс», Сассекс, Великобритания

В настоящее время в связи с повышенной необходимостью экономии энергии и, в частности, топлива, получаемого из нефти, ведутся исследования в области поиска новых видов топлив для всех типов силовых установок. Дизели на сегодняшний день являются наиболее эффективными силовыми установками для получения механической энергии из углеводородного топлива. При более широком внедрении дизелей в автомобильный транспорт они смогут сыграть значительную роль в экономии энергии. Однако, поскольку разведанные ресурсы нефти ограничены и, следовательно, ограничены возможности расширения ресурсов дизельного топлива за счет переработки нефтяного сырья, совершенно очевиден повышенный интерес к использованию в автомобильных дизелях новых видов топлива.

Попытка использования в качестве топлив для двигателей с воспламенением от сжатия не только средних дистиллятов не нова. Эксперименты были проведены на многих видах топлива, как полученных из угольной пыли, так и на высоковязких остаточных топливах, бензинах, спиртах и газах, в том числе на водороде.

В лабораториях «Рикардо Лэборэтрис» в течение прошедших лет было проведено много подобных экспериментов. Такие испытания включали как непосредственное воспламенение топлива от сжатия, так и методы использования двух топлив, а также воспламенение, вызываемое добавлением присадок.

На основании проведенных работ было сделано заключение, что при оценке пригодности топлива для автомобильных дизелей наиболее важным, определяющим показателем является характеристика воспламеняемости топлива. Значительны также проблемы, связанные с хранением и транспортированием

газообразных топлив и топлив с малой плотностью. Эти проблемы анализируются на основании как данных, полученных в лабораториях «Рикардо леорэтрис», так и сведений, полученных из других источников.

Введение. Дизель благодаря его топливной экономичности является основной силовой установкой транспортных средств всех промышленно развитых и развивающихся стран мира. Возможная нехватка топлива, получаемого из нефти, в ближайшее время и особенно в будущем вызвала повышенный интерес к использованию в двигателях внутреннего сгорания новых видов топлива. Очевидно, что комбинация дизеля с его высоким термическим к. п. д. с топливом, получаемым из источника с менее ограниченными ресурсами, имеет очень важное значение.

Интерес к новым топливам для двигателей с воспламенением от сжатия сам по себе не нов. По существу само дизельное топливо является «новым», так как Рудольф Дизель в своих первоначальных экспериментах в качестве топлива для разработанного им двигателя использовал каменноугольные смолы и каменноугольную пыль. В последние полвека в дизелях предлагалось использовать различные топлива. В числе большого количества предложений были побочные продукты химических и производственных процессов, такие, как метан из установок для сточных вод и креозот, получающийся в процессе производства газа и кокса из угля. Использование этих топлив преследовало цель предотвратить дефицит в дизельном топливе при национальном топливном кризисе.

Лаборатории «Рикардо», будучи передовыми в области исследования дизелей, испытали много различных топлив для них, включая применение метанола в серийных дизелях.

В настоящей работе обобщен опыт и сделана попытка показать наиболее обещающие источники подходящего дизельного топлива и высказать предположения относительно тех топлив, которые непригодны для дизельных двигателей.

Специфические требования дизеля к топливу. Рабочий цикл всех поршневых двигателей внутреннего сгорания требует, чтобы высвобождение энергии при сгорании топлива происходило в минимальном объеме цилиндра. В этом случае в бензиновом двигателе всасываемая и сжимаемая горючая смесь содержит максимальную концентрацию топлива и легко воспламеняется под действием искры. Это дает возможность точно регулировать опережение зажигания и, следовательно, высвобождение тепла в зависимости от положения поршня.

В дизеле топливо самовоспламеняется в результате повышения температуры топливного заряда при его сжатии в цилиндре. Это исключает возможность работы дизеля на всасываемой топливно-воздушной смеси, поскольку на температуру сжатия влияет очень много переменных. Необходимо получение самовоспламеняющейся под давлением топливно-воздушной смеси. Дросселирование вызовет снижение температуры сжатия, а изменение скорости подачи рабочей смеси приведет к тепловым потерям в охлаждаю-

щую среду. Температура впуска и характеристика самовоспламенения рабочей смеси оказывают также значительное влияние на воспроизводимость периода сжатия, когда происходит ее самовоспламенение. После самовоспламенения, если допустить, что оно произошло, смесь будет гореть неуправляемым образом аналогично горению смеси при детонации в бензиновом двигателе.

Необходимо производить сжатие заряда воздуха и впрыск топлива при высоком давлении в горячий воздух, в момент, когда условия самовоспламенения смеси достигнуты, а само самовоспламенение необходимо. При впрыске топлива образуется гетерогенная смесь: жидкость в капельном состоянии — воздух. Имеется ряд возможностей для корректирования концентрации рабочей смеси с целью обеспечения ее самовоспламенения даже при очень высоких отношениях топлива к воздуху, что исключает необходимость дросселирования. В этом случае изменение нагрузки регулируется только количеством вспрыскиваемого топлива и перспективы современных дизелей во многом зависят от того, насколько точно механизмы впрыска обеспечат регулирование момента воспламенения в двигателе и дозировку рабочей смеси. Комбинирование работы при высокой степени сжатия и недросселированной подаче топлива в двигатель при частичной нагрузке дает возможность достичь высокого термического к. п. д. Экономичность дизеля может быть дополнительно повышена путем использования в двигателе топлива с относительно более высокими удельной плотностью и соответственно объемной теплотой сгорания.

Среднедистиллятные топлива представляют собой наиболее дешевые продукты переработки нефти, потому что после перегонки они требуют лишь незначительной очистки. Однако необходимо иметь в виду, что требования современных дизелей являются довольно жесткими. В частности, важное значение имеют для дизельного топлива его самовоспламеняемость, испаряемость, вязкость, плотность и смазочная способность.

Характеристика самовоспламенения. В качестве показателя, характеризующего самовоспламеняемость дизельного топлива, служит цетановое число. Цетановое число показывает, что период задержки самовоспламенения в исследуемом топливе такой же, как и у эталонной смеси, содержащей n — цетана в количестве, отвечающем в процентах значению цетанового числа топлива, и остальное (до 100%) α -метилнафталина. При низких цетановых числах получается чрезмерная задержка самовоспламенения. Если период задержки самовоспламенения превысит период, в течение которого сжатый заряд воздуха сохранит необходимую температуру, то запуск двигателя будет неудачным, а его работа будет происходить с перебоями. При значительной задержке самовоспламенения большая часть топливного заряда будет поступать в камеру сгорания задолго до его самовоспламенения. В результате повысится давление, что вызовет шум в двигателе. Однако, когда воспламенение происходит главным образом в

момент предварительного смешения, то образуется меньше черного дыма, являющегося в основном продуктом диффузионного сгорания не полностью испарившегося топлива

Период задержки самовоспламенения дизельного топлива с данным цетановым числом не является постоянным, а зависит от физических условий в двигателе. В частности, задержка самовоспламенения зависит от продолжительности впрыска топлива, что, в свою очередь, влияет на изменение температуры смеси в конце сжатия над верхней мертвой точкой, соответствующей минимум около 5° опережения. Как опережение, так и задержка впрыска топлива приводят к увеличению периода задержки самовоспламенения, вызывая при опережении быстрое повышение давления и шум, а при задержке — перебои в зажигании.

Испаряемость. Испаряемость топлива, поступающего в цилиндры двигателя в жидком виде, имеет очень большое значение для образования надлежащей рабочей смеси с воздухом перед сгоранием. Испарению топлива способствует распыление его, благодаря чему создается более высокое отношение поверхности топлива к объему. Однако чрезвычайно быстрое распыление топлива в воздухе и испарение могут оказать вредное влияние на послойное смесеобразование, имеющее важное значение для хорошего сгорания.

Испаряемость топлива оказывает влияние и на другие аспекты работы дизеля. Легкоиспаряющиеся топлива могут вызвать образование паровых пробок на входе в топливный насос низкого давления. Плохая испаряемость топлив, содержащих тяжелые полициклические углеводороды, склонна замедлять скорость сгорания и вызывать дымные выхлопы.

Вязкость. Трудно сказать, что имеет более важное значение для дизельного топлива — испаряемость или вязкость. С точки зрения сгорания влияние вязкости автомобильного дизельного топлива минимально. Однако вязкость играет важную роль в обеспечении нормальной работы впрыскивающих механизмов. Низкая вязкость дизельного топлива ведет к ухудшению его смазывающих свойств и к утечке топлива, особенно на малой частоте вращения. Высокая вязкость для обеспечения прокачивания насосом и нормального впрыскивания требует подогрева топлива.

Плотность. Большая плотность топлива указывает на то, что топливо содержит тяжелые фракции, которые могут оказать вредное влияние на состав отработавших газов. Однако, вообще говоря, плотность, если она не будет выходить за пределы стандартных требований к дизельному топливу, не оказывает отрицательного влияния на работу двигателя. Поскольку количество топлива измеряется объемным способом, при изменении плотности изменится отношение количества воздуха к топливу или номинальная мощность. При увеличении плотности увеличится мощность двигателя, а вместе с ней дымность отработавших газов. Но более высокая плотность означает, что можно пройти больше километров на литре такого топлива, и это является одним из фак-

Таблица 1 Нормативные требования к дизельным топливам

Показатель качества	Топливо			
	Великобритания		США ¹	
	A1	A2	1-D	2-D
Внешний вид	Светлое и прозрачное	Светлое и прозрачное	Светлое и прозрачное	Светлое и прозрачное
Фракционный состав, °C				
начало кипения	187,8	181,1	165,6—198,9	171,1—204,4
10% выкипает до	210,0	222,2	187,8—221,1	204,4—237,8
50% » »	272,2	267,2	210,0—248,9	243,3—282,2
90% » »	357,2 (макс.)	357,2 (макс.)	237,8—271,1	287,8—321,1
конец кипения	364,4 ²	367,2 ²	260—293,3	304,4—348,9
Плотность при 15,6 °C, кг/л	0,838 ²	0,865 ²	0,806—0,826	0,840—0,860
Содержание общей серы % по массе	Не более 0,5	Не более 1,0	0,05—0,20	0,2—0,5
Содержание углеводородов, % по объему				
ароматических		27,3 ²	8—15	Не менее 27
нафтеновых		38,2 ²		
олефиновых		0,7 ²	Остальное	Остальное
парафиновых		33,8 ²		
Температура вспышки, °C	Не менее 54	Не менее 54	Не менее 49	Не менее 54
Вязкость при 37,8 °C, сСт	1,6—6,0	1,6—6,0	1,6—2,0	2,0—3,2
Цетановое число	Не менее 50	Не менее 45	48—54	42—50

¹ Нормативы Управления по охране окружающей среды, удовлетворяющие требованиям по предотвращению загрязнения окружающей среды

² Показатели, не включенные в спецификации

торов, определяющих превосходство дизеля по сравнению с бензиновым двигателем

Смазочная способность. Как уже было сказано, при рассмотрении роли вязкости механизмы впрыска топлива очень чувствительны к его смазывающим свойствам, поскольку в большинстве случаев топливо является основным смазочным материалом. Высокое давление впрыска и большая частота вращения вызывают в деталях конструкции напряжения, близкие к контактным.

Технические нормы. Типичные технические нормы на дизельные топлива для автомобильных двигателей Великобритании и США приводятся в табл. 1.

Обзор возможных новых видов дизельного топлива. В табл. 2 приводится список (правда, далеко неполный) наиболее вероятных новых дизельных топлив. Автомобильное дизельное топливо находится в центре этой гаммы топлив, многие из которых в нормальных условиях не могут рассматриваться пригодными для применения в дизелях, но представляют интерес для особых случаев.

Автомобильные дизели сконструированы и изготовлены из расчета работы на жидком топливе. В автомобильном дизеле в

качестве топлива используются средние дистилляты нефти, на долю которых приходится 5-6% выхода. Поэтому при поиске новых дизельных топлив целесообразно прежде всего рассмотреть возможность расширения пределов извлечения из нефти большего количества дизельного топлива за счет включения в него как более легких, так и более тяжелых фракций, чем применяемые в настоящее время. Недавние исследования фирмы «Эксон» [1] показали, что без ущерба для экономичности в качестве дистиллятного топлива может использоваться до 50% вырабатываемого из нефти автомобильного топлива. Исходя из этого возникает вопрос, есть ли необходимость искать какие-то необычные новые виды топлива для дизелей, пока имеется достаточное количество нефти? Однако при таком решении проблемы придется произвести значительные изменения в технологии переработки нефти. Возможно, представляет интерес исследование применения в дизелях новых видов продуктов, вырабатываемых на современных нефтеперерабатывающих заводах. Из тяжелых фракций, вырабатываемых в настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах, к таким топливам относятся другие дистилляты, котельные и остаточные топлива. Из легких фракций к ним относятся керосин, автомобильный бензин и сжиженный нефтяной газ.

Другими источниками получения жидкого топлива являются уголь и природный газ. Из угля можно получать кокс, каменноугольную смолу и креозот, синтетические дистилляты, бензины и синтетический природный газ. Природный газ может быть сжижен или превращен в метанол для того, чтобы его можно было экономичнее транспортировать и удобнее использовать в качестве автомобильного топлива.

Наконец, в число новых топлив необходимо включить водород. Возможно, что он станет основным топливом для двигателей внутреннего сгорания, поскольку, как известно, водород может получаться путем электролиза воды с помощью электричества, производимого атомными электростанциями.

Работы лабораторий «Рикардо» в области новых видов топлива. В лабораториях «Рикардо» была испытана практически вся гамма топлив, представленных в табл. 2. Некоторые из этих исследований проводились 50 лет тому назад и по современным стандартам данные, полученные в то время, не могут быть использованы для детального анализа. Тем не менее полученные результаты во всех случаях отражают проблемы конкретного топлива, связанные с использованием его в дизеле, и его недостатки в случае применения на современных высокооборотных автомобильных дизелях.

Тяжелые дистилляты и котельные топлива. При применении наддува в одноцилиндровом двигателе, оборудованном системой сгорания Рикардо Комет Mk III, показанной на рис. 1, двигатель становится относительно нечувствительным к качеству топлива, в частности к его цетановому числу. В связи с этим проведена была серия испытаний для того, чтобы показать рабо-

Таблица 2 Некоторые возможные топлива и их источники

Сырье	Продукт	Способ производства
Вода	Водород	Электролиз
Природный газ	Метанол	Каталитическая конверсия угля с водяным паром
	Жидкий природный газ	Компримирование и охлаждение природного газа
Нефть	Жидкий нефтяной газ	Перегонка и компримирование
	Автомобильный бензин	» » другие процессы
	Керосин	» » очистка
	Автомобильные дистилляты	» » смешение
	Прочие дистилляты	Перегонка
	Котельные топлива	Остаток после перегонки
Уголь	Остаточные »	То же
	Синтетический природный газ	Пиролиз угля
	Синтетический бензин	Гидрогенизация угля
	Синтетические дистилляты	Процесс Фишера—Тропша или гидрогенизация
	Креозоты, получаемые из смолы	Пиролиз и перегонка
	Кокс	Остаток после пиролиза

ту на топливах от легких дистиллятов до очень тяжелых фракций [2]. Все топлива имели одинаковое, довольно низкое цетановое число, что было обусловлено высоким содержанием ароматических углеводородов. Их вязкость при 21°C колебалась в широких пределах, но при более высоких температурах различия были менее значительными. Температура застывания также колебалась в широких пределах.

Испытания проводились при 500 и 1250 об/мин и различных температурах на впуске при наддуве 0,07 МПа, а также и без наддува при 500 об/мин. Если взять два условия работы двигателя — работу без наддува при 500 об/мин и с наддувом 0,07 МПа при 1250 об/мин, то получится моделирование характеристик турбонаддува, но без противодействия отработавших газов. Типичная температура на впуске может быть равна 30—90°C.

На основании кривых нагрузки, показанных на рис. 2, можно видеть, что при низкой частоте вращения ни одно из топлив не может удовлетворить требованиям, предъявляемым к автомобильным дизельным топливам. Самые плохие характеристики получают на наиболее тяжелом топливе. При 1250 об/мин наиболее легкие топлива соответствуют требованиям, предъявляемым к газойлю, более тяжелые топлива этим требованиям соответствуют не полностью. Неудовлетворительная характеристика более тяжелых топлив объясняется меньшей скоростью сгорания, о чем наглядно свидетельствует диаграмма изменения давлений в цилиндре, полученная во время испытаний.

Улучшение характеристики тяжелых топлив при больших скоростях может быть объяснено хорошим смешением с воздухом и температурой на впуске. Испытания при 1250 об/мин и наддуве

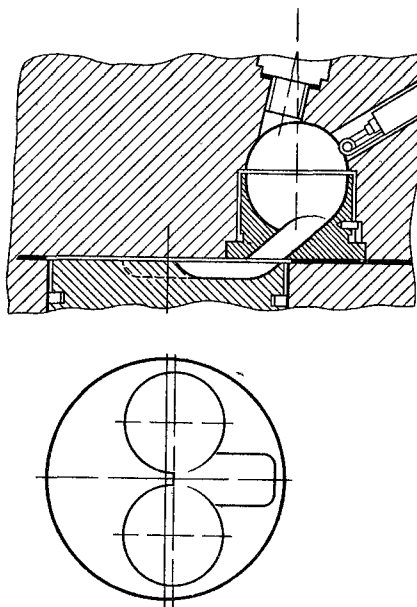


Рис 1 Камера сгорания Рикардо Комет Мк III

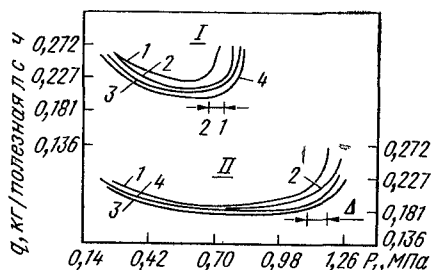


Рис 2 Удельный расход топлива (q) двигателя Рикардо Комет в зависимости от среднего эффективного индикаторного давления (P_e)

1 — 500 об/мин нулевой наддув 86° угла поворота до м.т. II 1250 об/мин наддув 0,07 МПа 194° 1 адмиралский котельный уголь из венесуэльской нефти сорт «В» 3 легкий индустриальный топливо сорт «А» 4 газойль 4 — предельная температура отработавших газов для всех топлив в этом двигателе и впуск 2 I — предельная температура отработавших газов (все прочие топлива образуют видимый дым до м.т.х. впуск)

0,07 МПа при температуре 30°C показали, что характеристики венесуэльского флотского дизельного топлива значительно ухудшаются

Крупные тихоходные судовые двигатели удовлетворительно работают на тяжелых топливах, не сомненно, благодаря тому, что при работе на этих двигателях отводится больше времени для сгорания. В описанных испытаниях вполне приемлемые характеристики были получены при использовании систем сгорания с большим завихрением, а следовательно, и с большой скоростью смешения при высоких температурах и наддуве. Однако максимальная частота вращения при этом была равна 1250 об/мин, что недостаточно по сравнению с частотой вращения для современных дизелей грузовых автомобилей, которые главным образом используют камеры сгорания с непосредственным впрыском типа, показанного на рис 3. Следовательно, необходимо сделать вывод, что применение тяжелых дизельных и котельных топлив на современных дизельных двигателях грузовых автомобилей будет связано с большими трудностями.

Тяжелые топлива не могут практически использоваться на подобных двигателях потому, что из-за их вязкости и температуры застывания при работе придется пользоваться подогревом. Кроме того, при эксплуатации дизелей грузовых автомобилей на этих топливах возникает проблема засорения форсунок вследствие высоких эксплуатационных температур. В крупных тихоходных двигателях форсунки приходилось охлаждать. Такое

усложнение конструкции вряд ли приемлемо для автомобильных двигателей грузовых автомобилей.

Тем не менее на основании проведенных испытаний можно сделать вывод, что дизели удовлетворительно работают на более тяжелых топливах, чем в настоящее время, но меньшая скорость сгорания таких топлив отражается на периоде задержки самовоспламенения и характеристике дымности отработавших газов.

Керосины. Керосин представляет собой дистиллятное топливо, содержащее большее количество легких и меньше тяжелых компонентов по сравнению с дизельным топливом. Как видно из табл. 3, и керосин, и газойль содержат значительную часть одинаковых фракций, но в керосине содержится меньше серы и тяжелых ароматических углеводородов. Его плотность меньше, а характеристика самовоспламенения лучше (более высокое цетановое число), чем у газойля.

Как видно из приведенных на рис 4 сравнительных графиков, быстроходные дизели без каких-либо трудностей могут «чисто» и с высоким к.п.д. работать на керосине. Двигатель, на котором проводились испытания, имел тороидальную камеру сгорания с непосредственным впрыском, представленную на рис 3. Объем четырех его цилиндров составлял 3857 см^3 . В условиях эксплуатации двигателя при его переводе с газойля на керосин не было ничего изменено, за исключением увеличения объемного расхода топлива для компенсации мень-

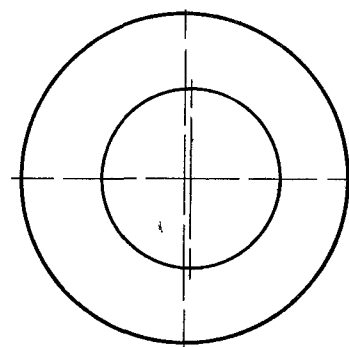
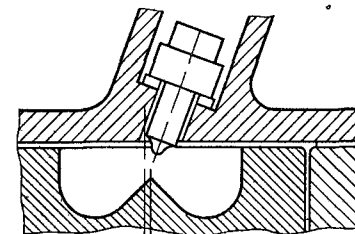


Рис 3 Тороидальная камера непосредственного впрыска

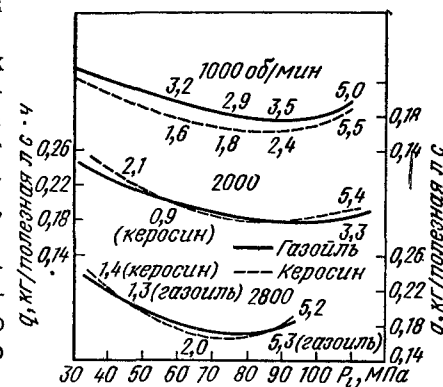


Рис 4 Удельный расход топлива (q) в зависимости от среднего эффективного индикаторного давления (P_e) 4-цилиндрового двигателя с непосредственным впрыском и объемом цилиндров 3867 см^3

шей плотности керосина. Ряд кривых свидетельствует о том, что содержание дыма в отработавших газах, за исключением работы на самой большой частоте вращения, снижается и характеристика по дымности улучшается. Это улучшение при 1000 об/мин довольно заметно и, возможно, свидетельствует о лучшем смесеобразовании в камере сгорания и при работе на керосине, чем на газойле. В двигателе с непосредственным впрыском такое улучшение является компромиссом между условиями эксплуатации на малой и большой частоте вращения.

Очень низкое содержание серы в керосине (около 0,02%) является и положительным, и отрицательным фактором. С одной стороны это решает проблему исключения содержания сульфатов в отработавших газах, для решения которой при использовании дизельного топлива в дизелях нет других путей, а с другой стороны необходимо иметь в виду, что сера в автомобильных дизелях улучшает смазочные свойства топлива при чрезвычайно высоких нагрузках. Благодаря содержанию в топливе серы, оно может эффективно использоваться для смазки трущихся деталей топливного насоса. В частности, толкатели кулачков и направляющих в распределительном насосе работают в режиме, близком к напряжению заедания, и удаление серы из топлива без соответствующей замены противозадирной присадкой может привести к серьезным неполадкам в работе этих деталей.

Таблица 3 Физические свойства газойля и керосина

Показатель	Газойль	Керосин
Внешний вид	Красный, светлый, прозрачный	Красный, светлый, прозрачный
Плотность при 15,6°C, кг/л	0,838	0,782
Вязкость при 37,8°C, сСт	2,86	1,33
Температура, °C		
вспышки	77,8	46,1
помутнения	-6,7	-43,3
застывания	-12,2	-48,3
Коксовый остаток по Конрадсону, % по массе	0,09	0,04
Содержание общей серы, % по массе	0,76	0,02
Фракционный состав, °C		
начало кипения	187,8	157,2
10% выкипает до	210,0	173,9
50% » » »	272,2	198,9
90% » » »	335,6	235,0
конец кипения	364,4	256,1
Выход, % по объему	98,5	99
Остаток, % по объему	1,0	1,0
Теплотворная способность низшая, ккал/кг	10184,1	10339,7
Цетановое число	55,0	56,0
Содержание углеводородов, % по объему:		
ароматических	28,3	7,7
нафтеновых	38,3	32,2
олефиновых	0,7	0,3
парафиновых	33,7	59,8

При рядом расположении топливных насосов смазка кулачков и направляющих топливного насоса не страдает в такой степени, но все же рекомендуется добавлять противозадирные присадки.

В холодных районах Северной Америки керосин благодаря его низкой температуре застывания, конечно, используется. Применение газойля в связи с образованием в нем кристаллов парафина при температурах ниже -6,7°C может вызвать серьезные эксплуатационные проблемы, связанные с забивкой фильтров и топливных коммуникаций. Эти проблемы могут быть решены с помощью добавки дизелена, базовым компонентом которого служит керосин. К такому топливу обычно добавляют смазочную (противоизносную) присадку.

Очевидно, что керосин является очень подходящим новым видом топлива для применения в высокооборотных автомобильных дизелях, которые при этом потребуют лишь минимальной модификации.

Автомобильные бензины. Согласно некоторым предположениям, с использованием дизельных двигателей в легковых автомобилях возможны затруднения, связанные с изменением структуры потребления автомобильного бензина и дизельного топлива, для преодоления которых придется внести изменения в технологические процессы переработки нефти. Однако в работе [1] высказывается и иное мнение о том, что это не вызовет проблемы при рассмотрении ее как долгосрочной. Дизели, одинаково хорошо работающие и на бензине, не создадут такой проблемы в ближайшее время, но зато дадут возможность сэкономить значительные количества топлива при их использовании. В данный период, конечно, не идет речь об экономии топлива за счет большей плотности дизельного топлива. Не это является побуждающим стимулом в современной заинтересованности в двигателях с послойным распределением заряда топлива.

Однако еще до появления проблемы экономии топлив нефтяного происхождения в современном ее понимании вопрос о возможности эксплуатации дизелей на автомобильном бензине был поставлен представителями вооруженных сил, которые требовали создания многотопливных двигателей. Вооруженные силы требовали, чтобы дизели могли работать на топливах в диапазоне от обычного дизельного топлива до керосина и автомобильного бензина с октановым числом 80. Это позволило бы в случае войны эксплуатировать двигатели на любом из имеющихся топлив.

Основная трудность эксплуатации дизелей на бензинах заключается в том, что бензины обладают худшей характеристикой самовоспламенения, которая еще более снижается в результате добавления к бензину тетраэтилсвинца, используемого для повышения его детонационной стойкости. Как видно из сопоставления октановых и цетановых чисел ряда бензинов, показанного на рис. 5, бензины с высокими октановыми числами имеют низкие цетановые числа [6].

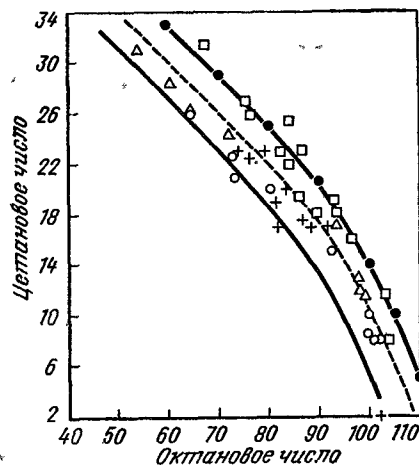


Рис 5 Зависимость между цетановыми и октановыми числами по исследовательскому методу различных бензинов с присадками (тетраэтилсвинец, тетраметилсвинец, циклогексилнитрат, изопропилиитрат):

х — бензин на основе парафиновых углеводородов с октановым числом 93,
+ — бензины на основе ароматических углеводородов с октановым числом 93,
о — бензин с базовым компонентом А,
△ — бензин с базовым компонентом В,
□ — смеси изооктана и -гептана

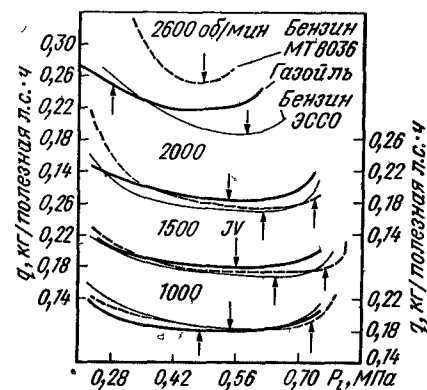


Рис 6. Удельный расход топлива (q) в зависимости от среднего эффективного давления (P_e) 6-цилиндрового дизеля с объемом цилиндров 4916 см^3 при работе на дизельном топливе и бензине (IV — устойчивые колебания вала)

Плохая характеристика самовоспламенения бензинов вызывает наибольшие трудности при попытке замены ими дизельных топлив. Длительный период задержки самовоспламенения приводит к запаздыванию начала сгорания и, следовательно, к перебоям в работе двигателя при большой частоте вращения. Поэтому требуется работать с опережающим впрыском и принимать меры для сокращения периода задержки самовоспламенения путем подогрева подаваемого воздуха или повышения степени сжатия. Последний способ привлекателен тем, что он позволяет сократить период задержки самовоспламенения в топливах с низким цетановым числом, вызывая при этом лишь незначительное ухудшение характеристики нормального дизельного топлива.

На рис. 6 приводится сравнение характеристик бензина и дизельного топлива при различных нагрузках и частоте вращения 6-цилиндрового двигателя грузового автомобиля с непосредственным впрыском и с объемом цилиндров 4916 см^3 . Степень сжатия была повышена с 17 до 19, что позволяло устанавливать компромиссное опережение впрыска для использования всех трех топлив. На меньшей частоте вращения уменьшается дымность. Улучшение цвета отработавших газов можно объяснить более полным сгоранием топлива, что связано с его лучшим испарением и смешением с воздухом. Обычно принято считать, что дымность отработавших газов при работе на дизельном топливе объясняется диффузионным характером сгорания жидкого топлива. «Компромиссное» опережение впрыска

оказывало незначительное влияние на характеристику при работе на газойле и приводило лишь к увеличению шума, который, однако, был меньше, чем на бензине.

Снижение топливной экономичности на большой частоте вращения и при малой нагрузке двигателя объясняется началом перебоев вследствие более длительных периодов задержки самовоспламенения, особенно при работе на топливе МТ80

На рис 7 приводятся типичные диаграммы давления в цилиндре и подъема иглы при работе двигателя на дизельном топливе и бензине. Можно видеть, что в этом примере, когда не увеличивалась степень сжатия, в результате опережения впрыска и удлиненного периода самовоспламенения на всех топливах сгорание проходило с очень большой скоростью. Фотографии, снятые в этих условиях [5], свидетельствуют о том, что прежде всего сгорает бензиновая смесь.

Исследования показали также образование за пределами камеры сгорания остаточной газовой смеси в цилиндрах двигателя, которая детонирует и вызывает повреждение днища поршня. Такое повреждение типично для бензиновых двигателей при детонации и для более продолжительной работы двигателя, когда повреждение увеличивается и становится большим.

Очевидно, что решение проблемы эксплуатации дизеля на бензине зависит от сокращения задержки самовоспламенения. Кроме повышения температуры в конце сжатия, о котором говорилось выше, для сокращения периода самовоспламенения можно использовать присадки. С этой целью был испытан целый ряд присадок. Характеристика их влияния приводится в табл. 4.

Наиболее эффективным в присутствии тетраэтилсвинца, очевидно, является добавление 5% смазочного масла. При добавлении смазочного масла увеличивается цетановое число, минимально снижается октановое число, а сокращение задержки самовоспламенения происходит при минимальном риске повреждения от детонации. При использовании добавок смазочного масла полностью устранялись повреждения днища поршня и, кроме того, обеспечивалась смазочная способность бензина, необходимая для топливного насоса. Несмотря на это, при работе на бензине в двигателе с рядным расположением топливных насосов требуется и отдельная система смазки.

Для предотвращения образования паровых пробок в каналах топливного насоса, что является проблемой при применении лег-

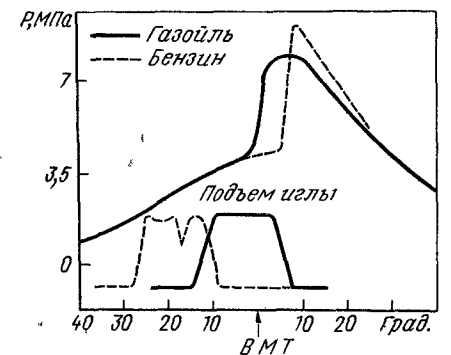


Рис 7. Диаграмма изменения давления (P) в цилиндре в зависимости от величины угла поворота коленчатого вала

Таблица 4 Влияние присадок на цетановое и октановое числа бензинов

Топливо	Цетановое число	Октановое число
ПЭТ* 93 чистое	19,0	93,1
» 93+5% по объему топлива DERV**	21,0	89,5
» 93+5% » » смазочного масла	22,0	91,7
» 93+0,838 г Рв в виде ТЭС/л	11,0	103,8
» 93+0,838 » Рв » » ТЭС/л + 5% дизельного топлива	13,0	100
ПЭТ 93+0,838 г Рв в виде ТЭС/л + 5% смазочного масла	18,0	102,3

* ПЭТ — первичное эталонное топливо

** Топливо DERV — топливо для дизелей сухопутных транспортных машин

коиспаряющихся топлив и вызывает кавитационные явления, топливная система должна быть рециркуляционной с подачей под давлением.

Одной из альтернатив решения проблемы улучшения самовоспламеняемости является работа на двух топливах. При этом способе вначале впрыскивается обычное дизельное топливо, а затем подается бензин. Однако в связи с трудностями, с которыми связано создание топливной системы с двумя форсунками для подачи в цилиндры двух топлив, а также возникновением дополнительной проблемы сжигания бедной смеси, такое решение проблемы улучшения самовоспламенения бензина малоперспективно. Как будет сказано ниже, подобный вариант применим только при работе на газообразном топливе.

Попытки использования для работы на бензине отдельных камер сгорания или предкамерного впрыска до сего времени оказывались менее успешными, чем применение бензина в двигателях с непосредственным впрыском. Высокие скорости смешения и большие тепловые потери приводят к чрезмерному увеличению периода самовоспламенения и соответственно к ненадежному самовоспламенению при всех условиях работы двигателя, за исключением работы на полной нагрузке, когда двигатель прогрет. Подтверждением этого является работа автомобильных дизелей на бензине. Единственным решением этой проблемы является использование двигателей с послойным распределением топливного заряда.

Газообразные углеводородные топлива. Газы, наверно, являются наиболее естественными топливами для дизелей.

Как было объяснено выше, воспламенение от сжатия может практически быть осуществлено только благодаря высокой степени расслоения, которое имеет место при впрыске жидкого топлива. Поскольку газы могут быть введены в камеру сгорания лишь в газообразном виде, первое требование образования бога-

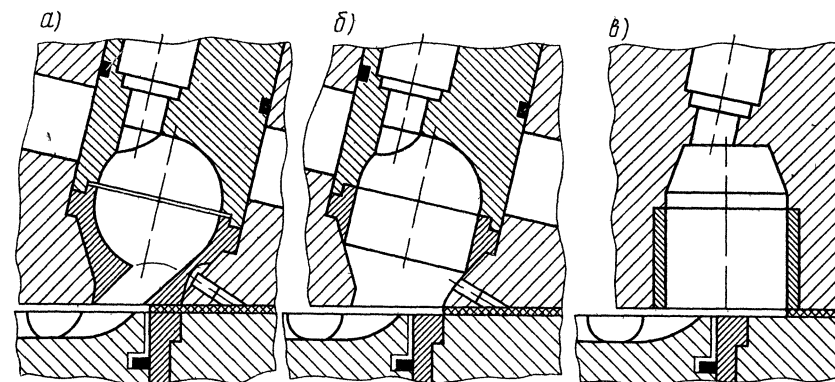


Рис 8 Варианты камеры сгорания Рикардо Комет, использовавшиеся при работе на природном газе

а — вариант 1 степень сжатия 17,0, б — вариант 2 степень сжатия 14,9 в — вариант 3 степень сжатия без кольца — 12,9 с кольцом — 14,2

той смеси в данном случае реализовано быть не может и поэтому очень важно при применении газообразных топлив пользоваться способом работы на двух топливах с применением вспомогательного заряда дизельного топлива в качестве источника самовоспламенения. Такая система широко используется в крупных стационарных двигателях. Газ вводится в камеру сгорания через самостоятельный газовый клапан, находящийся в головке блока цилиндра или газового карбюратора, а вспомогательный заряд дизельного топлива впрыскивается при помощи обычной дизельной форсунки. Вопросы, касающиеся типичных крупных двигате-

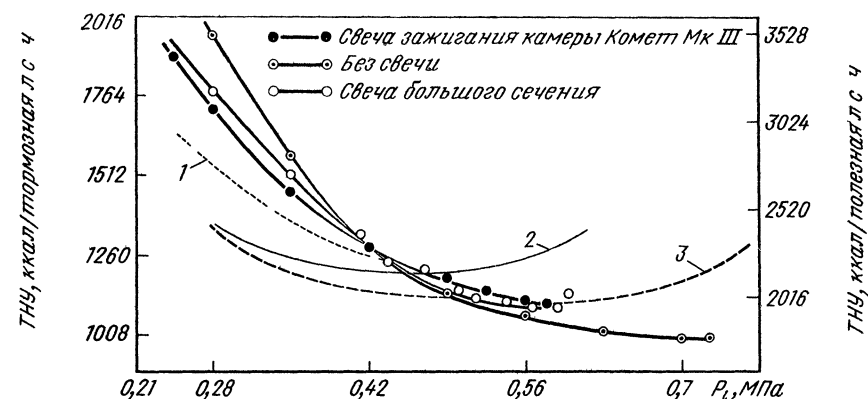


Рис 9 Теплосодержание несгоревших углеводородов (ТНУ) в зависимости от среднего эффективного индикаторного давления (P_i) двигателя с предкамерным впрыском природного газа

1 — дросселированный впуск, 2 — свеча зажигания большого сечения в камере сгорания дизеля, 3 — камера сгорания дизеля Комет Мк III

лей, работающих на двух топливах, рассмотрены и обобщены в двух отчетах лабораторий «Рикардо» [6, 7]

Газообразное топливо в дизельных двигателях находит широкое применение в качестве вспомогательного для достижения большей чистоты отработавших газов или ограничения дымности. Благодаря использованию газа (бутана или пропана) при нагрузках свыше 70% можно добиться лучшего сгорания, чем при работе на дизельном топливе. В работе [8] приводятся результаты испытаний такой системы, применяемой на автобусах Вены и Амстердама.

Если применение газа ограничить только областью свыше 70%-ной нагрузки, то реальный расход газа будет незначительным и в этом случае вряд ли можно его считать перспективным дизельным топливом. С другой стороны, производство сжиженных нефтяных газов по сравнению с производством бензина невелико и, даже если они окажутся хорошим топливом для дизелей, возможные их ресурсы для этих целей незначительны.

В лабораториях «Рикардо» исследована возможность непосредственного «впрыска» в двигатель природного газа, главным образом метана. Использовался одноцилиндровый двигатель с объемом цилиндров 1629 см³ и камерой Комен, показанной на рис. 8 (вариант 1).

У метана намного более высокая детонационная стойкость, чем у большинства других газообразных топлив. Тем не менее, как видно из рис. 9, максимальная мощность ограничивалась детонацией до среднего эффективного индикаторного давления 0,52 МПа. После удаления горловины вихревой камеры, как показано на рис. 8 (вариант 3), среднее эффективное индикаторное давление удалось довести до 7,4 МПа.

Расход топлива при малых нагрузках был незначительным из-за трудностей сгорания топлива в области бедных смесей. Каким образом было установлено, что бедные метановые смеси в двухтопливных двигателях сгорают неудовлетворительно. Некоторое дросселирование впуска при частичной нагрузке, как это показано на рис. 9, давало возможность улучшить процесс, однако чрезмерное дросселирование приводило к перебоям в самовоспламенении. Серьезной проблемой при использовании газообразного топлива в дизелях могут стать несгоревшие углеводороды.

Модификация камеры сгорания с целью ее приспособления для работы только на метане и только на дизельном топливе, очевидно, неприемлема. Маловероятно, чтобы можно было создать камеру сгорания, быстро переключающуюся с одного топлива на другое.

Несомненно, что система с непосредственным впрыском наиболее подходит для работы на двух топливах. Однако при использовании в дизелях в качестве топлива природного газа возникают проблемы, не связанные с возможностью его применения в камере сгорания. К таким проблемам относятся хранение, транспортирование и перекачка газа в транспортных средствах. В свя-

зи с очень низкой температурой кипения природного газа он должен храниться в газообразном виде при высоком давлении в газовых баллонах или жидким — в криогенных баках с вентиляционной системой для выпуска испаряющегося под влиянием теплопередачи газа. Транспортирование сжатого или сжиженного природного газа на большие расстояния неэкономично. Было показано, что лучше метан превращать в метанол, который более удобен в качестве топлива для автомобилей, так как при нормальных температурах находится в жидком состоянии.

Метанол. Согласно расчетам, метанол может производиться по цене значительно более низкой, чем газойль, при сопоставлении цен за единицу производимой энергии. Поэтому метанол можно рассматривать в качестве возможного перспективного топлива для дизелей. Ресурсы метанола менее ограничены, чем ресурсы нефти. Метанол получают из угля и других углеродсодержащих веществ, из которых выход его гораздо больший, чем по современным оценкам может быть добыто нефти и природного газа. Метанол получают каталитической конверсией метана с водяным паром.

В лабораториях «Рикардо» недавно исследовалась возможность применения в автомобильных дизелях максимального количества метанола при минимальной их переделке [11].

В определенных количествах метанол может быть смешан с бензином и с большинством дизельных топлив. У метанола очень большое октановое число по исследовательскому методу (более 100). Имея в виду низкую самовоспламеняемость метанола, было решено, что наиболее выгодно использовать метанол в двигателях, работающих на двух топливах, в которых метанол бы всасывался, а с обычной системой впрыска подавалось вспомогательное топливо, используемое для обеспечения самовоспламенения рабочей смеси. Испытания проводились на одноцилиндровом двигателе, к которому был добавлен карбюратор с регулируемым главным жиклером без дроссельной заслонки. Других изменений не производилось. В остальном полностью удовлетворялись требования к автомобильному двигателю с непосредственным впрыском (см. рис. 3).

Вскоре стало очевидным, что первым фактором, ограничивающим количество метанола, которое может быть использовано, являлось тепло, поглощаемое им из воздуха для своего испарения. Скрытая теплота испарения метанолом равна 263,4 ккал/кг. Такое охлаждение топливного заряда вызывает понижение температуры всего процесса горения, тем самым ограничивая долю метанола, которая может быть использована, особенно на большой частоте вращения. Подогрев поступающего воздуха оказался практически бесполезным из-за того, что требовались очень высокие температуры. Для подогрева смеси с помощью охлаждающей воды использовался теплообменник, который устанавливался между карбюратором и двигателем. Благодаря этой системе температуру на впуске удавалось повысить до нормально-

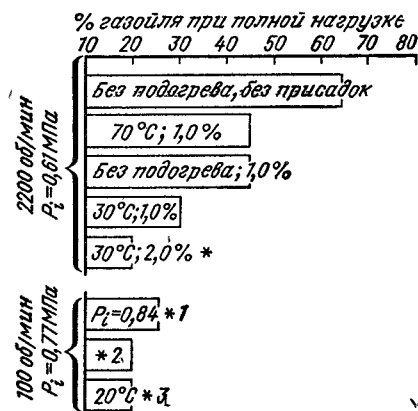


Рис 10 Система метанол — газойль. Указаны температура смеси на впуске и процент содержания аминитрата

* — при более высоких температурах детонирует, *1 — без подогрева и без добавления присадок, *2 — без подогрева. Детонирует при $P_c = 0,784$ МПа, *3 — детонирует при $P_c = 0,805$ МПа

ного значения для дизельных двигателей — примерно $26,7^\circ\text{C}$. Присутствие метанола оказывало очень незначительное влияние на индекс сгорания.

Было удивительным, что при восстановлении нормальной температуры в конце сжатия и добавления к метанолу вспомогательного топлива период самовоспламенения значительно увеличивался. Предположительно это можно объяснить снижением характеристики самовоспламенения дизельного топлива при его смешении с метанолом.

При нагреве воздуха возникала проблема «детонации», или самовоспламенения, метанола, несмотря на его высокие антидетонационные свойства. Поэтому использование дальнейшего подогрева топливно-воздушного заряда для восстановления нормаль-

ного периода воспламенения было невозможно

Предпринимались попытки сократить период задержки самовоспламенения дизельного топлива с помощью добавления присадки, повышающей цетановое число, — аминитрата. Этим достигался желательный эффект, но одновременно снижалась детонационная стойкость рабочей смеси, особенно при малой частоте вращения двигателя. При малых количествах дизельного топлива пределы детонации и гашения пламени на полной нагрузке были очень близки друг к другу.

Установлено, что на метаноле с присадкой аминитрата можно работать при 70%-ной нагрузке от максимальной и при большей частоте вращения (2200 об/мин), без присадки — при 80%-ной нагрузке и 1000 об/мин. Работа на большой частоте вращения ограничивалась гашением пламени, а не малой — детонацией рабочей смеси. Дальнейшее добавление аминитрата на большой частоте вращения вызывало детонацию, которая становилась ограничивающим фактором. На рис. 10 приводятся в обобщенном виде достигнутые до сих пор предельные возможности использования метанола.

Хотя эти уровни могут быть достигнуты в условиях установившегося режима, в переходных условиях практически невозможно изменить количество аминитрата и будет трудно регулировать нагрев смеси с достаточной точностью, чтобы избежать гашения пламени или детонации. Существуют, по-видимому, и другие системы, которые следовало бы рассмотреть, в том числе

и системы с непосредственным впрыском метанола и изменением других параметров двигателя. Однако, очевидно, что метанол не является простой альтернативой для существующих дизельных топлив.

Кроме того, наряду с проблемами горения следует помнить и о том, что из-за низкой теплоты сгорания метанола для него придется вдвое увеличить вместимость топливных баков. Настораживает также и токсичность метанола, попадание которого в кровь может привести к катастрофическим результатам.

Водород. Высказывались мнения о том, что основным топливом для двигателей внутреннего сгорания в перспективе станет водород, получаемый путем электролиза воды с использованием в качестве первичного источника энергии ядерной энергии. При отсутствии углеводородного топлива водород смог бы стать подходящим средством для хранения энергии в виде, пригодном для использования на автомобильной технике.

С помощью водорода можно было бы решить большинство современных проблем, связанных с ограничением загрязнения окружающей среды.

Дизель, по всей вероятности, не будет первой силовой установкой с водородом в качестве источника энергии. Однако еще в 1926 г. Рикардо проводил некоторые испытания в интересах Министерства авиации [12] с целью исследования возможности сжигания водорода, который должен был выкачиваться из дирижаблей для компенсации потерь в весе по мере расходования дизельного топлива.

Это давало возможность увеличить радиус действия дирижаблей при одновременной экономии дизельного топлива.

Для проведения испытаний использовался одноцилиндровый исследовательский двигатель с диаметром цилиндра 139,7 мм и ходом поршня 190,5 мм с одним трубчатым клапаном и открытой камерой сгорания в головке цилиндра, как показано на рис. 11. В этой камере достигалась высокая степень завихрения при подаче топлива. Стенки камеры сгорания были изолированы стальной трубкой.

Последнее способствовало плавному сгоранию при работе двигателя на дизельном топливе. Водород вводился с поступающим воздухом через диффузор, размещенный в системе всасывания, при давлении 0,25 кПа.

Испытания предусматривали увеличение подачи водорода при различных поступлениях дизельного топлива до тех пор, пока из-за преждевременного воспламенения водорода от теплоизоляционной трубки, находящейся в камере сгорания, сгорание не становилось чрезмерно «ненормальным» или неустойчивым. При удалении этой трубки задерживалось начало воспламенения. Получаемая при этом характеристика показана на рис. 12. Устойчивость работы двигателя обеспечивалась поддержанием в цилиндре максимального давления, которое ограничивалось величиной 5,6 МПа.

Отношение подачи топлив (1 кг водорода на 13 кг дизельного топлива) устанавливалось для среднего эффективного индикаторного давления примерно 0,56 МПа. Ниже этой нагрузки двигатель легко мог потреблять весь подаваемый водород.

Топлива, получаемые из угля. На основе угля можно синтезировать всю гамму топлив. Бензин и дистиллятные

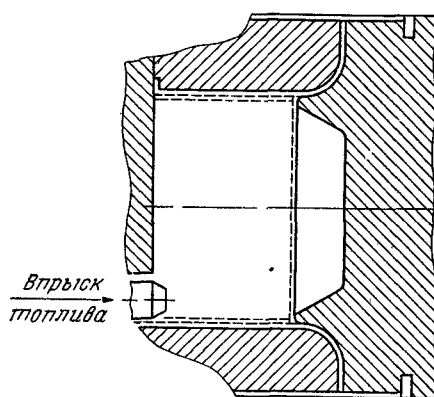


Рис 11 Вихревая камера для испытаний при работе двигателя на водородоуглеродном топливе

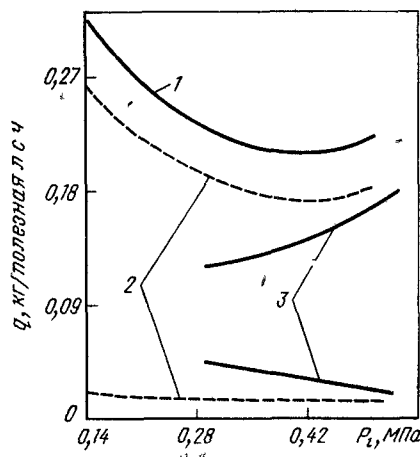


Рис 12 Удельный расход (q) топлива в зависимости от среднего эффективного индикаторного давления (P_i):

1 — расход обычного дизельного топлива; 2 — расход смеси водород/газойль при постоянном соотношении 1/13; 3 — соотношение водород/газойль ограничено преждевременным воспламенением

топлива получают с помощью гидрогенизационных процессов. Дизельное топливо можно также получать и с помощью процесса Фишера—Тропша. Вообще говоря, производство жидкого топлива из угля оказалось неэкономичным, если сравнивать стоимость продуктов, получаемых из угля, со стоимостью продуктов, получаемых из нефти. Однако, согласно долгосрочным прогнозам, запасов угля хватит на значительно более длительный период, чем запасов нефти, и поэтому должен увеличиваться интерес к нему, как к источнику автомобильного топлива в перспективе. Синтетическое дизельное топливо играло важную роль в обеспечении Германии топливом при подготовке и ведении войны 1936—1945 гг. Интересно отметить, что в Южной Африканской республике фирма «Сасол» производит в настоящее время дизельное топливо из угля в промышленных масштабах, которое конкурентоспособно с нефтяным топливом.

Типлер в своем обзоре [12] показал перспективы эксплуатации дизелей на угле и его производных, но здесь мы не будем детально рассматривать все эти возможности. Бесспорно то, что если можно будет получить топливо, эквивалентное по качеству нефтяному дизельному топливу, то никаких проблем, связанных с переходом с одного топлива на другое, не будет и эксплуатационные трудности бу-

дут ограничены в какой-то мере побочными факторами, обусловленными минимальными отступлениями от характеристик топлива.

Эксплуатация дизелей на каменноугольных смолах и креозотах не является делом необычным, и по этому вопросу имеется целый ряд публикаций [13, 14]. Лаборатории «Рикардо» провели испытания на креозотах, полученных из различных источников [15]. Эти испытания были ограничены исследованием характеристик самовоспламенения топлив при их смешении в различных пропорциях с газойлем. Креозот смешивался с газойлем в концентрации 25 и 50% и сравнивался с эталонными топливами с высокой и низкой характеристиками самовоспламенения, а также с определенными цетановыми числами. Основным показателем для сравнения служило давление на входе после дросселирования, при котором происходила персбой в воспламенении. Эти испытания проводились на дизельном вихревом двигателе с предкамерным впрыском. Рикардо Вирлпул ID1 (рис 13) и на двигателе Гарднер с камерой непосредственного впрыска, как показано на рис 14. Испытания проводились при 1000 об/мин и среднем эффективном индикаторном давлении 23 МПа.

На рис 15 приводятся результаты зависимости цетановых чисел от давления на входе. Показатели двух двигателей имели хорошую сходимость. Разница заключалась лишь в том, что двигатель с вихревой камерой мог работать на более низком цетановом топливе.

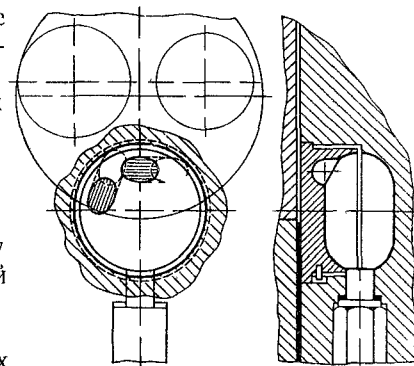


Рис 13 Вихревая камера сгорания

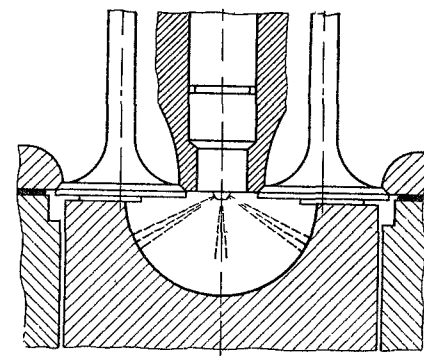


Рис 14 Камера сгорания Гарднера с непосредственным впрыском

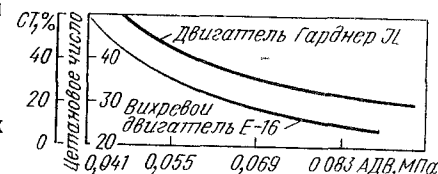


Рис 15 Цетановая характеристика смесей креозота и газойля

СТ — содержание топлива с хорошим самовоспламенением в топливе с плохим самовоспламенением. ЦДВ — абсолютное давление на входе

Оценка цетановых чисел смесей в общем может быть представлена в следующем виде

Смесь	Цетановое число
100 % газойля	* 50
25 % креозота	36—41
50 % креозота	24—33
100 % креозота	0—16
	(значения получены экстраполяцией)

Характеристики топлив носят несколько отвлеченный характер, но очевидно, что задержка самовоспламенения является основной проблемой при использовании в качестве дизельных топлив креозотов, имеющих чрезвычайно низкие цетановые числа, как это было установлено в ходе испытаний. Естественно, что эти топлива вряд ли можно рассматривать в качестве перспективных для автомобильных дизелей даже в смеси пополам с газойлем.

Единственной возможностью использования этих топлив является превращение их в более легкие дистилляты путем гидрогенизации, если это будет обеспечено ресурсами и оправдано экономически.

Выводы

Поскольку в недалеком будущем по тем или иным причинам может неоставаться традиционного топлива или его использование станет экономически невыгодно, возникнет необходимость перевода эксплуатируемых в настоящее время двигателей на другие топлива. При долгосрочном анализе возможностей использования различных топлив дизельных двигателей имеет значение высокий термический к п д. Рассматривая возможные топлива, необходимо помнить, что расход энергии не ограничивается превращением топлива в двигателе в работу. В зависимости от источника топлива приходится учитывать энергию, которую надо затратить для его получения. Необходимо также учитывать энергию, которую придется затратить на транспортирование топлива. Поэтому при оценке всех этих показателей подготовка и снабжение возможными топливами для дизелей не всегда могут оказаться экономичными, несмотря на высокий к п д двигателя. Модификация двигателя также может оказаться экономически невыгодной.

В настоящем докладе рассмотрены работы, проведенные в лабораториях «Рикардо». Возникающие проблемы и сложность мероприятий, осуществления которых требуется для того, чтобы некоторые наименее подходящие топлива можно было применять в дизельных двигателях, могут служить мерой пригодности этих топлив.

Во-первых, керосин и некоторые другие дистиллятные топлива. Эти топлива могут непосредственно использоваться в каче-

стве заменителей газойля без каких-либо изменений камеры сгорания двигателя. При работе на этих топливах для компенсации различных потерь расход топлива необходимо существенно увеличить. Необходимо также принять меры, обеспечивающие надежную смазку топливного насоса.

Во-вторых, бензины и тяжелые котельные топлива. При работе на этих топливах в связи с их значительно более низкой способностью самовоспламенения необходимо изменить установку впрыска и (или) степень сжатия. Возможно, потребуются подогрев подаваемого воздуха или использование присадок.

При испытании этих топлив проявилась их чувствительность к определенным топливным системам. Бензины предпочтительнее применять в двигателях с непосредственным впрыском, а тяжелые котельные топлива — в двигателях с предкамерным впрыском.

В-третьих, метанол и газы, включая водород. Вследствие очень низкой способности газов к самовоспламенению и трудностей в получении локально обогащенных смесей для их применения в дизелях необходимо пользоваться двухтопливным вариантом эксплуатации. Для этого надо либо иметь в двигателях две системы впрыска, либо вводить второе топливо вместе с воздухом. Всасывание топливно-воздушной смеси вызывает проблему «детонации», обусловленную преждевременным воспламенением, а также проблему образования несгоревших углеводородов вследствие создания в цилиндре областей с бедной смесью. Детонационный стук и преждевременное самовоспламенение являются причинами, ограничивающими возможность использования газов и метанола. Для газов приходится использовать сложные измерительные и контрольные системы, затрудняющие эксплуатацию двигателя.

В-четвертых, каменноугольные системы и остаточные топлива. В связи с очень низкой характеристикой самовоспламенения и несоответствием требованиям физических свойств этих топлив без их смешения с газойлем или другими легкими дистиллятами они не могут использоваться в автомобильных дизелях. Для поддержания скорости сгорания на определенном уровне могут использоваться лишь смеси топлив, состоящие из газойля с добавкой заменителя в настолько незначительных количествах, что их вряд ли можно отнести к действительно перспективным топливам. Без разбавления они могут использоваться только при наличии системы подогрева и, может быть, специальной системы зажигания.

Общие соображения. Очевидно, пока будут существовать и производиться по конкурентоспособным ценам топлива, перечисленные в первой и второй группах, автомобильные дизели сохраняют свой нынешний вид и будут эксплуатироваться на топливах, которые могут получаться из угля или из нефти, за исключением некоторых специфических условий применения, маловероятна эксплуатация автомобильных дизелей на двух топливах, включая метанол, из-за сложности системы.

Возможно, что все получающиеся из нефти топлива, перечисленные в первой и второй группах, одновременно станут недоступными, поэтому их необходимо экономить. В связи с этим представляет интерес возможность использования дистиллятного топлива широкого фракционного состава, а также автомобильных дизелей со вспомогательным зажиганием. Этой цели служат проводимые в настоящее время работы в области создания двигателей с послойным распределением топливного заряда.

Из топлив, перечисленных в третьей группе, метанол, вероятно, является наиболее перспективным, поскольку при нормальных температурах он представляет стабильную жидкость. Метанол не является идеальным дизельным топливом, однако следует иметь в виду, что в этом вопросе все еще остается много неисследованного. Ресурсы метанола, источником которого могут служить не только ископаемые топлива, заслуживают того, чтобы для его наиболее эффективного использования были сконструированы специальные двигатели. Высокая детонационная стойкость метанола дает возможность использовать двигатели с высокой степенью сжатия и искровым зажиганием.

Водород, хотя и относится к третьей группе, реально не может рассматриваться как подходящее топливо для дизелей вследствие относительно малого замещающего эквивалента.

Предложение об использовании двигателей для «широкой дистиллятной фракции» и «метанольных» ставит вопрос о проведении исследований в малоизученной области — в области искрового зажигания топливных смесей. Надо полагать, что исследования в этой области принесут пользу всем, кто занимается вопросами совершенствования систем сгорания для любых топлив, которые нелегко самовоспламеняются при сжатии.

Сейчас уже можно констатировать

1 Реальными перспективными топливами для дизелей являются лишь топлива, обладающие хорошей характеристикой самовоспламенения. К их числу относятся керосин и более тяжелые дистиллятные топлива, получаемые из нефти или угля.

2 Модификация и усложнение конструкции дизелей с целью применения топлив с низкой характеристикой самовоспламенения могут оказаться экономически и практически неоправданными, за исключением двигателей грузовых автомобилей большой грузоподъемности.

3 С целью сохранения возможности использования в автомобильных двигателях топлив нефтяного происхождения возможен вариант увеличения выхода дизельного топлива из нефти и создания дизеля, который мог бы работать на топливе с более широким фракционным составом.

4 Чтобы можно было использовать более «трудные» топлива, особенно метанол, потребуется разработка специальных двигателей, обеспечивающих более эффективное их применение. Маловероятно, что эти топлива с их низкими характеристиками самовоспламенения могут быть пригодны для современных дизелей.

5. Искровое зажигание топливных смесей может сыграть важную роль при разработке будущих двигателей, рассчитанных на применение перспективных топлив. В этом случае можно будет работать на двигателях с высокой степенью сжатия без дросселирования. Эти работы должны быть продолжены.

ОБСУЖДЕНИЕ

В. Т. Лин (Фирма «Камминс энджин К°»). Из сказанного сегодня вытекает, что метанол является очень широким топливом для всех двигателей, кроме дизельных. Используя метанол для других двигателей, мы сэкономим топливо для дизелей. Мне хотелось бы отметить, что когда мы хотим реально выразить к. п. д., то вместо килокалорий на лошадиную силу-час пользуемся мегаджоулями на киловатт-час. Наконец, я хотел бы спросить, если у Вас какие-либо данные относительно содержания загрязнений в отработавших газах для дизелей при работе на разном топливе?

Скотт. У нас нет никаких данных относительно содержания загрязнений в отработавших газах.

П. К. Т. де Бюер (Корнельский университет). Согласно Вашему заявлению, в дизеле не могут применяться многие топлива, в том числе водород. Мне хотелось бы отметить, что при работе на водороде, если его «впрыскивать» в камеру сгорания, а не вводить тем способом, о котором Вы говорили, потребуется небольшая модификация двигателя, как, например, искровое зажигание, поскольку водород не будет воспламеняться от сжатия. Во всяком случае при некотором усовершенствовании дизеля на нем можно будет применять забракованные Вами топлива, особенно водород.

Скотт. Да, возможно, что Вы правы, когда говорите о водороде. Но если собираетесь вводить искровое зажигание для воспламенения водорода, то мне кажется, что придется вводить дросселирование, а тогда это уже не дизель.

Дж. М. Колуччи (лаборатория фирмы «Дженерал моторс»). Я вспоминаю много рассказов о том, как профессор Дизель на одном из своих первоначальных двигателей применял порошкообразный уголь. Можете ли Вы прокомментировать вопрос о возможности применения порошкообразного угля в дизелях?

Скотт. Нет, мы никогда не применяли в дизелях порошкообразный уголь. Мой друг Билл Типплер из Перкинса опубликовал очень хорошую статью, в которой рассматривается вопрос об использовании твердых топлив в дизелях. Если Вас интересует этот вопрос, то Вы можете ознакомиться с этой статьей. У нас было достаточно проблем с рециркуляцией отработавших газов в дизелях. Я думаю, что при работе дизеля на твердых частичках топлива его нельзя будет нормально эксплуатировать.

Н. А. Шилке (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Имеются ли какие-либо наблюдения относительно

характеристики шумов при работе двигателя на испытанных Вами топливах?

Скотт. Вообще говоря, конечно, при работе на топливах с плохим самовоспламенением уровень шума выше. Любые меры повышения цетанового числа топлива дают возможность лучше ограничивать шум, возникающий в процессе горения

Ф. Л. Драйер (Принстонский университет). Я хотел бы подтвердить правильность Ваших комментариев относительно добавки воды к дизельному топливу. Как Вы знаете, Майк Хан, представляющий фирму «КАВ лимитид», показал, что при добавлении воды к дизельному топливу в отработавших газах значительно снижается содержание сажи и NO_x

Скотт. Воду мы впрыскивали главным образом на впуске в двигатель. Это не наилучший способ добавления воды. Однако и в этом случае в отработавших газах значительно снижалось содержание NO_x при сохранении мощности двигателя. Но на основании результатов, которые мне, а, возможно, и Вам приходилось наблюдать, несомненно, что добавление воды параллельно с топливом или вместе с топливом значительно более эффективно. Я не думаю, что на этот вопрос я мог бы ответить более детально, потому что о работах, проводимых фирмой КАВ, у меня вряд ли имеется больше сведений, чем у Вас. Но следует отметить, что главной проблемой, безусловно, является вопрос о том, как транспортировать воду и как предотвратить ее замерзание.

С. Г. Лиддл (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Проводились ли Вами какие-либо работы с растительными маслами — арахисовым или хлопковым?

М. А. Эллиот (консультант по энергии). В Министерстве сельского хозяйства в 40-е годы имелась лаборатория, которая проводила исследования в области характеристики растительных масел, таких, как арахисовое и хлопковое.

Скотт. Как мне кажется, когда дизели работают на кукурузном масле, то отработавшие газы пахнут свежеспеченным хлебом.

Р. В. Харн (Управление по энергетическим исследованиям и разработкам). Несколько лет тому назад я проводил испытания дизеля на арахисовом масле. Во время этих испытаний запах отработавших газов был отвратительным.

Четвертая часть

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АВТОМОБИЛЬНЫЕ ТОПЛИВА И ОБЩАЯ ОЦЕНКА ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ИМИ

Председатель заседания С. С. ПЕННЕР
Калифорнийский университет, Сан-Диего, штат Калифорния, США

ВОДОРОД В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. Дж. МАК ЛИАН, П. К. Т. де БОЕР, Х. С. ХОМАН, Дж. Дж. ФАГЕЛЬСОН
Корнельский университет, Итака, штат Нью-Йорк, США

Были проведены лабораторные исследования и стендовые испытания водорода в качестве топлива для поршневых двигателей. Для оценки изменений мощности, экономичности и загрязнений при работе на водородном топливе использовалась термодинамическая модель. Стендовые испытания проводились на одноцилиндровом двигателе CFR, приспособленном для работы на водороде. Как при теоретических исследованиях, так и при стендовых испытаниях особое внимание обращалось на использование водорода путем непосредственного впрыска в двигатель, поскольку в этом случае достигаются стабильные мощность и экономичность, предотвращаются обратные вспышки, преждевременное воспламенение и загрязнение окружающей атмосферы. Сравниваются результаты расчетных моделей и стендовых испытаний.

На теоретической модели термодинамического типа скорость сгорания связывалась корреляционной зависимостью со скоростью распространения турбулентного пламени. Принималось, что водород должен быть «впрыснут» и перед воспламенением перемешан с воздухом. Модель была адиабатной. Для оценки температурного перепада в цилиндре предполагалось, что продукты сгорания газов оставались несмешанными. Содержание окислов азота NO_x в продуктах сгорания вычислялось на основании модели распространения скорости пламени по Зельдовичу. Было установлено, что реакции с образованием NO не имели существенного значения при общем образовании окислов азота даже в условиях работы на самых бедных смесях. Результаты, полученные с помощью модели, показали возможность непосредственного впрыска водорода в двигатель при различных условиях его работы. При работе на бедной смеси при соотношении с воздухом менее 0,6 достигаются особенно благоприятные условия для получения высокой мощности и низкой эмиссии NO_x . Вследствие относительно высокой температуры пламени и большой скорости сгорания рабочей смеси водорода с воздухом при соотношении 0,8 образование NO_x достигает максимального уровня и резко снижается при работе на более богатых смесях. Удельное содержание NO_x малочувствительно к степени сжатия.

Стендовые испытания проводились с использованием головки двигателя с предкамерой для оценки цетанового числа и головки двигателя для оценки стандартных октановых чисел по CFR, работающего по циклу Отто. Испытания с впрыском горючего вблизи положения поршня у верхней мертвой точки через предкамерную головку показали возможность регулирования двигателя, работающего на водороде. При высокой степени сжатия (более 17) и зажива-

нии от искры происходили большие и частые колебания давления. В отличие от этого при использовании калильного зажигания горение протекало очень плавно. Было также установлено, что при позднем зажигании не обеспечивалось достаточное перемешивание горючего и воздуха в двигателе, в результате чего имело место неполное сгорание.

Испытания, проводившиеся с головкой к двигателю по циклу Отто, показали, что с увеличением продолжительности впрыска горючего и при опережении впрыска достигалось улучшение эффективности сгорания, увеличение мощности и термического КПД двигателя. Однако при рабочей смеси, близкой к теоретической нормальной, и при высоких степенях сжатия тенденция к преждевременному ее воспламенению. Эти испытания показали, что при непосредственном впрыске водорода требуется тщательное регулирование топливно-воздушной смеси. Содержание окислов азота в отходящих газах при стендовых испытаниях показало хорошую сходимость с результатами, полученными с помощью теоретической модели. В то же время при работе на бедной смеси достигалось увеличение мощности двигателя при очень незначительном образовании окислов азота.

Сделан вывод, что недресселированный поршневой двигатель с непосредственным впрыском водорода является перспективным. При работе на весьма бедных смесях воздуха с водородом достигается значительная экономия топлива и снижение загрязнения атмосферы.

Введение При изучении перспективы будущих автомобильных топлив особенно большое внимание в настоящее время обращают на топлива, получаемые из ископаемых источников энергии, ресурсами которых США владеют в изобилии. Для ограничения потребности в импортной нефти необходимо будет не только использование этих ресурсов, но и приложение больших усилий для экономии топлива. Однако, когда речь идет о прогнозировании на длительный период, даже эти источники топлив (в первую очередь уголь и горючие сланцы) будут истощены и значительную часть потребности в энергии придется удовлетворять за счет использования ядерной, солнечной и геотермальной энергии. Тем не менее, особенно для транспорта, будет ощущаться необходимость в высокоэнергетических топливах, которые можно было бы получать из легко доступных источников.

В качестве такого топлива рассматривается водород, который можно получать термическим или электролитическим способом из воды. Концепции «водородной экономики» в последние годы уделено достаточно внимания [1, 2, 3, 4], и мы не будем останавливаться на этом вопросе в данной работе. Основные трудности использования водорода в качестве моторного топлива заключаются в том, что системы его хранения, которыми мы располагаем в настоящее время, очень тяжелы и занимают много места. Для улучшения положения были предложены гидриды металлов и криогенные системы хранения водорода. Обширные исследования в этом направлении продолжаются.

Был проведен целый ряд исследовательских работ в области использования водорода в качестве топлива для поршневых двигателей, обзор которых в значительной мере представлен в работе [5]. Короче говоря, была установлена возможность использования способности водорода с воздухом воспламеняться в широком интервале топливных смесей для получения эффективной бед-

ной смеси в недресселируемых условиях. Однако при работе двигателя на таком легковоспламеняющемся и быстро горящем топливе, каким является водород, необходимо принять меры для предотвращения преждевременного воспламенения и детонации рабочей смеси. Содержание окислов азота в отработавших газах ограничивается путем эксплуатации двигателя на бедных смесях. При работе двигателя на полной мощности их содержание в отработавших газах может быть больше, чем при работе двигателя на бензине. Более подробные сведения по этому вопросу можно получить из литературы, список которой прилагается.

В данной статье рассматривается использование водорода в поршневых двигателях с искровым зажиганием. Особое внимание обращено на характеристику двигателя (мощность и экономичность) и на содержание загрязнений в отработавших газах. Основной целью теоретических исследований и стендовых испытаний была количественная оценка водорода с точки зрения снижения содержания загрязнений в отработавших газах и высокой топливной экономичности.

Характеристика сгорания водорода. Некоторая характеристика работы двигателя может быть получена на основании изучения термодинамических свойств и сгорания в нем водорода. В данном разделе рассматриваются свойства водорода, особенно те из них, которые представляют интерес для его сравнения с углеводородными топливами. Сводные сведения относительно наиболее характерных свойств водорода в сравнении со свойствами эталонного изоктана приводятся в табл. 1.

Таблица 1 Термодинамические свойства и характеристика сгорания водорода и изоктана

Показатель	Водород	Изоктан
Теплота сгорания, кДж/кг	120 000	44 400
Пределы воспламенения в воздухе или в условиях (Ф), % по объему		
бедной смеси	4,0 (0,10)*	1,0 (0,6)
то же	9,0 (0,23)**	
богатой смеси	75,0 (7,1)	6,0 (3,8)
Свойства стехиометрической смеси		
отношение воздуха к топливу (в единицах массы)	34,6	15,2
отношение воздуха к топливу (в объемных единицах)	2,38	59,7
объемная энергоемкость при стандартных температуре и давлении Дж/см ³	3,18	3,73
Приближенная скорость ламинарного пламени при Ф = 1 и давлении 0,1 МПа, см/с	180	40
Минимальная энергия воспламенения при Ф = 1, давлении 0,1 МПа кДж	0,02	1,0

* Распространение искрового пламени в верхнем направлении

** Распространение искрового пламени в верхнем и нижнем направлениях

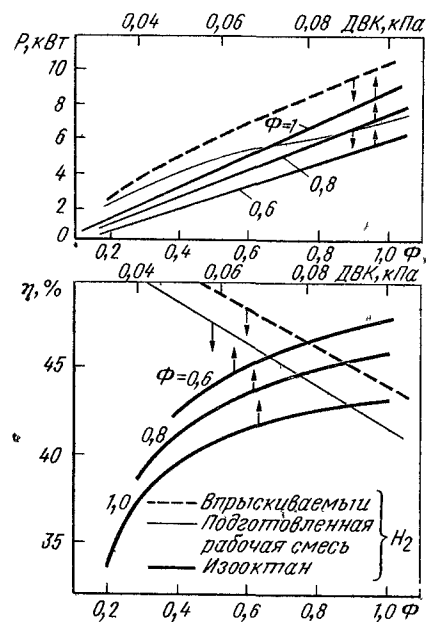


Рис 1 Влияние Φ и давления во впускном коллекторе (P_k) на мощность (P) и к. п. д. (η) идеального топливно-воздушного цикла для водорода и изooктана

бытка воздуха, пропорциональна энергосодержанию (теплоте сгорания) единицы объема рабочей смеси. Исходя из этого данные, приводимые в табл. 1, свидетельствуют о том, что при стехиометрическом соотношении водорода и кислорода воздуха мощность двигателя должна быть на 15% меньше мощности, получаемой при стехиометрии изooктана и кислорода воздуха в условиях примерного равенства рабочих циклов. Путем непосредственного впрыска водорода в цилиндры можно добиться увеличения плотности топливного заряда и тем самым полезной мощности двигателя.

Относительная характеристика двигателя, работающего по циклу Отто на различных топливах, может быть оценена путем сравнения характеристики двигателя, работающего по адиабатному идеальному топливно-воздушному циклу, при котором соблюдаются температура и состав, зависящие от термохимических свойств, учитываются также остаточные фракции и потери на дросселирование. Принимается, что сгорание топливно-воздушной смеси происходит мгновенно при положении поршня в в. м. т.

На рис. 1 приводится анализ изменения мощности и экономичности двигателя с рабочим объемом, эквивалентным рабочему объему одноцилиндрового двигателя CFR (рабочий объем

Окисление водорода происходит быстро по относительно термически нейтральным бимолекулярным цепным реакциям. В противоположность этому при окислении углеводородов в связи с более медленными эндотермическими реакциями разрушения топлива процесс протекает по механизму термических разветвленных цепных реакций. В результате этой фундаментальной разницы процесс горения водорода значительно отличается от процесса горения углеводородов. Так, например, очень широкие пределы воспламеняемости водорода, относительно высокая скорость пламени и низкая энергия воспламенения являются непосредственными результатами нетермической природы цепного процесса разветвления.

Мощность поршневого двигателя, в который поступает топливный заряд при определенных давлении и температуре с заданным коэффициентом избытка воздуха, пропорциональна

611 см³, степень сжатия 8) при работе на водороде и изooктане. В процессе испытаний двигатель не устанавливался по верхней или нижней мертвой точке, как это обычно делается при испытании топливно-воздушных смесей. Производилась установка фаз по клапанному распределению, что не оказывает влияния на определение экономичности, хотя и получаются несколько заниженные мощности. Мощность и экономичность даются в зависимости от коэффициента избытка воздуха, поскольку предполагается, что при давлении в коллекторе работа не связана с дросселированием. Рассматриваются два варианта использования водорода. Один из них предполагает подачу в двигатель без дросселирования водородно-воздушного топливного заряда, а второй — только воздуха, а водород подается непосредственно в цилиндр двигателя перед воспламенением. Для изooктана рассматриваются коэффициенты избытка воздуха Φ , равные 0,6, 0,8 и 1,0, а регулирование мощности достигается путем дросселирования впускаемой рабочей смеси. При этом мощность и экономичность двигателя находятся в зависимости от давления во всасывающем коллекторе.

Как было уже упомянуто, при использовании обоих топлив при стехиометрических соотношениях и при атмосферном давлении в коллекторе на предварительно подготовленной рабочей смеси с водородом мощность получается на 15% меньше, чем на рабочей смеси с изooктаном. При непосредственном впрыске водорода в цилиндры двигателя значительно повышается плотность топливного заряда, а мощность увеличивается примерно на 40% по сравнению с мощностью, получаемой на предварительно подготовленной рабочей смеси с водородом. С точки зрения термического к. п. д. в варианте с недросселируемой подачей водорода имеет место увеличение экономичности при малой мощности. Это объясняется благоприятным термодинамическим эффектом (соотношения удельных теплоемкостей, уменьшение диссоциации). Аналогичные результаты получаются при работе на изooктане, но в этом случае потери, связанные с дросселированием (что необходимо для регулирования мощности двигателя), ведут к снижению экономичности при низких нагрузках двигателя (низкое давление в коллекторе).

Результаты, представленные на рис. 1, могут быть использованы для сравнения водорода и изooктана в качестве топлив для поршневых двигателей. Такое сравнение можно сделать, сопоставляя экономичность при равной снимаемой мощности или путем сопоставления снимаемых мощностей при равных термических к. п. д.

Методология моделирования двигателя. Результаты, получаемые при идеальных топливно-воздушных циклах, позволяют в некоторой мере судить о потенциальных возможностях использования водорода в качестве топлива для двигателя. Однако для расчета модели, с помощью которой можно было бы получать результаты, сопоставимые с опытными данными, требуется бо-

тсе тщательный анализ цикла. Для того чтобы на этой модели можно было получать хорошую оценку экономичности и мощности двигателя, в качестве основных процессов должны учитываться очень чувствительные к температуре процессы образования NO_x , конечные скорости сгорания и теплопередача. Необходимо знать также и температурные перепады в цилиндре при ускоряющемся горении.

Основное внимание уделялось установлению тенденций в изменении мощности, экономичности двигателя и содержания загрязнений в отработавших газах. Поэтому не было необходимости усложнять систему для более тщательного анализа теплопередачи. Тем не менее конечные скорости сгорания учитывались. Поскольку потери тепла снижают как мощность, так и экономичность, ожидалось, что вычисленные мощность и экономичность должны быть больше измеренных. Что же касается образования NO_x , то оно происходит в основном в высокотемпературных газовых скоплениях на известном расстоянии от теплового пограничного слоя стенки цилиндра, и поэтому пренебрежение теплопередачей не должно вызвать серьезных ошибок. Снижение температуры скопления газа вследствие теплопередачи через стенку происходит только в том случае, когда скопления газов адиабатно расширяются, чем обеспечивается непрерывность взаимодействия с охлаждающей средой — граничными газами большей плотности. Например, если теплопередача обуславливает снижение давления в цилиндре на 10%, то соответствующее снижение температуры газов составляет всего лишь 2%.

Конечная скорость сгорания учитывалась на основании допущения, что турбулентное пламя, имеющее по отношению к несгоревшим газам скорость S_T , распространяется сферически от источника горения. Вводится допущение, что скорость S_T пропорциональна ламинарной скорости пламени S_L и при этом коэффициент пропорциональности учитывает частоту вращения вала двигателя. Скорости сгорания увеличиваются с увеличением частоты вращения, как это бывает в обычных условиях. Ламинарная скорость распространения пламени определялась по формуле Семенова. Следует иметь в виду, что S_T не является постоянной величиной, а зависит от свойств сгоревшего и несгоревшего газов. В системе неподвижных координат наблюдается ускорение пламени в цилиндре двигателя вследствие комбинированного эффекта расширения сгоревшего газа и увеличения скорости пламени S_L .

Коэффициент пропорциональности для скорости распространения пламени определялся путем выбора константы, позволявшей получать хорошую сходимость между вычисленными и измеренными опережениями зажигания, соответствующими оптимальному крутящему моменту. Опережение зажигания характеризует скорость сгорания непосредственно, поскольку для горящих при более высоких скоростях смесей достижение максимальной снимаемой мощности происходит при меньшем опережении зажига-

ния. Сравнения измеренных и вычисленных опережений зажигания, определенных таким способом, представлены на рис. 2, на котором опережение зажигания дается в виде зависимости от коэффициента избытка топлива. Параметры модели с самого начала были выбраны путем сравнения опережений зажигания, вычисленного и измеренного по методу Стебара и Паркса (7). При этом достигалась хорошая сходимость во всех случаях, за исключением работы на богатых смесях, когда из-за детонации двигателя приходилось устанавливать более позднее опережение зажигания для достижения оптимальных условий. На рис. 2 представлены также данные относительно опережения зажигания, полученные позднее на проведенных нами собственных экспериментах. Эти эксперименты и методика получения оптимального опережения зажигания рассматриваются в следующем разделе. Сходимость между измеренными и вычисленными опережениями можно считать удовлетворительной. Отклонения, как правило, не превышали угла поворота коленчатого вала в 5° .

Дополнительное свидетельство соответствия модели для определения скорости сгорания представлено на рис. 3. На нем приводится сравнение между продолжительностями вычисленного и измеренного горения, которые даются в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Продолжительность горения определяется как время от момента воспламенения искрой зажигания до момента сгорания 99% массы топливного заряда. Предполагаемые скорости горения определялись путем пересчета данных, получаемых на модели, в показатели, соответствующие условиям, в которых проводились эксперименты с предварительно подготовленным (смешанным) топливным зарядом. Продолжительность экспе-

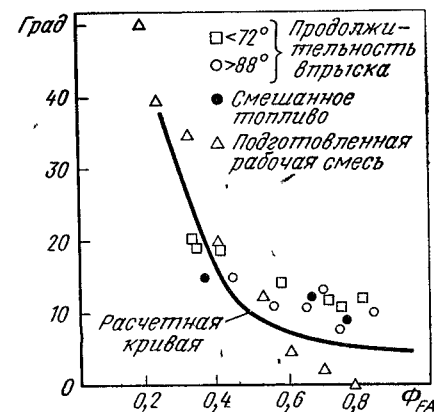


Рис 2 Влияние Φ на период опережения зажигания в двигателе CFR (степень сжатия 8, 1200 об/мин; головка Отто)

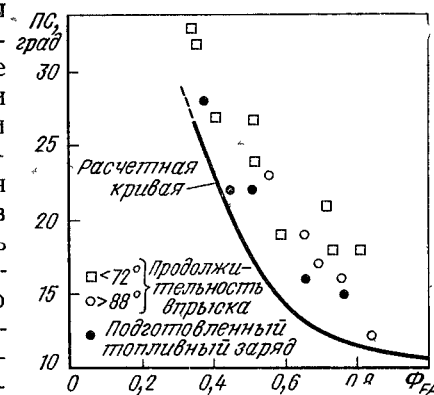


Рис 3 Влияние Φ на продолжительность сгорания (Пс) в двигателе CFR при работе на водороде (степень сжатия 8; 1200 об/мин; головка Отто)

риментального горения определялась по изменению давления в цилиндре двигателя как время между искровым разрядом и моментом достижения максимального давления в цилиндре. Несмотря на то что при максимальном давлении в цилиндре может иметь место и неполное сгорание, все же максимальное давление и полное сгорание очень близко совпадают в таком быстро горящем топливе, как водород.

Из рис. 3 видно, что получаемая на модели расчетным путем тенденция изменения продолжительности сгорания в зависимости от коэффициентов избытка воздуха аналогична результатам измерений. При этом расчетная продолжительность сгорания обычно на несколько градусов меньше измеренной. Можно также отметить, что измеренные продолжительности сгорания для вариантов с непосредственным впрыском топлива в цилиндр оказываются несколько больше, чем продолжительности, определенные для вариантов со смешиваемыми топливными зарядами, хотя, казалось, более быстрое горение можно было бы ожидать при непосредственном впрыске из-за высоких давлений в цилиндре. Меньшая скорость сгорания в вариантах с непосредственным впрыском обусловлена, очевидно, недостаточным перемешиванием топлива и воздуха перед сгоранием. Более подробно этот вопрос рассматривается в следующем разделе. Можно заметить, что чем короче продолжительность впрыска, тем больше продолжительность сгорания (см. рис. 3). Эта тенденция соответствует бедной смеси, образующейся при сокращении продолжительности сгорания (см. результаты и обсуждение).

Выброс в атмосферу NO_x с отработавшими газами оценивался по модели Зельдовича для горячих продуктов, полученных при постоянной скорости сгорания. Перепад температуры сгоревших газов при прогрессивном горении учитывался путем рассмотрения полученных продуктов сгорания в дискретных зонах со своей однородной температурой. Допускалось, что атомы азота находятся в стационарном состоянии, а атомы кислорода в равновесном состоянии с молекулами кислорода. Более подробные детали, касающиеся методов вычисления с помощью модели, приводятся в других работах [6, 8].

Описание испытаний. Обширные стендовые испытания были проведены на одноцилиндровом двигателе Вокеша CFR (Cooperative Fuel Research). Испытания проводились как на двигателе с дизельной головкой, предназначенной для оценки цетанового числа топлива, так и на двигателе с головкой, предназначенной для оценки октанового числа бензина. Основная часть результатов, полученных на двигателе с дизельной головкой, приводится в работе [5], а в данной работе в основном рассматриваются результаты испытаний, полученные на двигателе с «бензиновой» головкой. Крутящий момент на выходном валу двигателя измерялся с помощью балансирной электромашинки TLSDC, типа GE, что позволяло использовать электромашину и как электродвигатель, и как генератор, измеряя силу трения и момент на валу

испытываемого двигателя. Переоборудование двигателя для работы на водороде включало установку в стенке цилиндра топливной форсунки для впрыска водорода (рис. 4). Форсунка приводилась в действие гидросистемой с помощью стандартного насоса Боша [9]. С помощью этой форсунки обеспечивался непосредственный впрыск водорода в цилиндр. Однако был проведен целый ряд испытаний, при которых осуществлялось предварительное перемешивание водорода и воздуха во впускном коллекторе. Для этой цели использовалась медная трубка длиной 33 см с большим количеством мелких отверстий, вставлявшаяся в трубу вблизи всасывающего клапана. Водород в трубку подавался через игольчатый клапан ламинарного счетчика Мерриам, а расход водорода измерялся с помощью счетчиков (ротаметра) $1/8-20$ Трифлет. Расход воздуха как при непосредственном впрыске, так и при предварительном перемешивании водорода с воздухом измерялся с помощью счетчика B6N-25 Фишера и Портера.

Для измерения давления в цилиндре двигателя на модифицированной свече зажигания был смонтирован пьезоэлектрический датчик давления Сандстренд 601 В, протарированный с помощью ротационного генератора Тектроникс через каждые 10° поворота коленчатого вала. На основе стандартных индикаторных точек получались электрические сигналы, свидетельствовавшие о начале и окончании впрыска водорода. Все сигналы непрерывно фиксировались осциллографом Тектроникс.

На рис. 5 и 6 представлены соответственно схемы отбора проб отработавших газов и хемилюминесцентного датчика NO. На выпускной линии была установлена емкость для проверки, влияет ли на получаемые результаты неравномерность потока отработавших газов и концентрация NO. Пробы отбирались как на подводящем, так и на отводящем трубопроводах емкости. Было установлено, что эти пробы давали в основном идентичные результаты. Вода поглощает NO_2 . Поэтому для предотвращения кон-

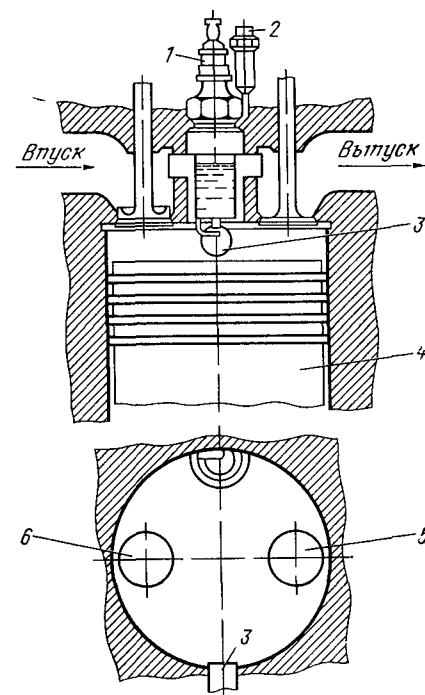


Рис. 4 Двигатель CFR с головкой цикла Отто, модифицированный для работы на водороде путем добавления форсунки для впрыска водорода
1 — свеча зажигания 2 — датчик давления в цилиндре 3 — форсунка 4 — поршень 5 — выпускной клапан 6 — впускной клапан

денсации паров воды вся пробоотборная линия нагревалась до 350 К. При очень бедной топливно-воздушной смеси значительная часть окислов азота в отработавших газах представляла собой NO_2 . Сохранение NO_2 в пробоотборной линии играло решающую роль в получении точных измерений. Исключение конденсации паров воды в системе выпуска отработавших газов означало, что датчик NO находился скорее во влажной среде. Однако присутствие паров воды на определение содержания NO хемилуминесцентным методом влияло незначительно.

При проведении сравнительных опытов на бензине было установлено, что на богатых смесях каталитический преобразователь NO_x в NO значительно снижал концентрацию NO . Такое снижение при работе на водороде также имело место, когда углеводороды искусственно вводились в отработавшие газы. Когда преобразователь обходили, то показания содержания NO оставались приемлемыми. Установка каталитического преобразователя на байпасной линии использовалась при всех измерениях, в том числе при оценке богатых бензино-воздушных смесей.

Использовавшийся в ходе испытаний хемилуминесцентный датчик NO был сконструирован в соответствии с хорошо известными законами [10] и тарировался перед каждым испытанием с помощью стандартной смеси, содержащей 1075 частей на миллион NO в сухом азоте.

Для определения полноты сгорания к выпускной линии подсоединяли полярографический анализатор кислорода (рис 7). Система отбора проб кислорода была полностью отделена от системы отбора проб NO . Анализатор представлял собой прибор Бекмана модели 742, который измерял электрический ток, образующийся в амперометрическом датчике в контакте с анализируемым образцом. Датчик состоит из газопроницаемой тефлоновой мембраны, золотого анода, серебряного катода и электролита из

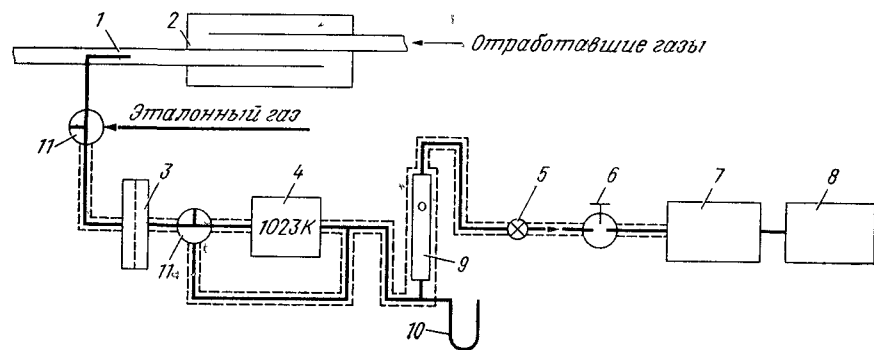


Рис 5 Система отбора проб для определения содержания окислов азота в отработавших газах. Трубопровод с отработавшим газом нагрев до 358 К. 1 — датчик в потоке газа, 2 — глушитель, 3 — фильтр для улавливания механических частиц, 4 — $\text{NO}-\text{NO}_x$ конвертор, 5 — запорный клапан, 6 — игольчатый клапан, 7 — детектор NO , 8 — вакуумный насос, 9 — расходомер, 10 — ртутный манометр, 11 — трехходовой клапан.

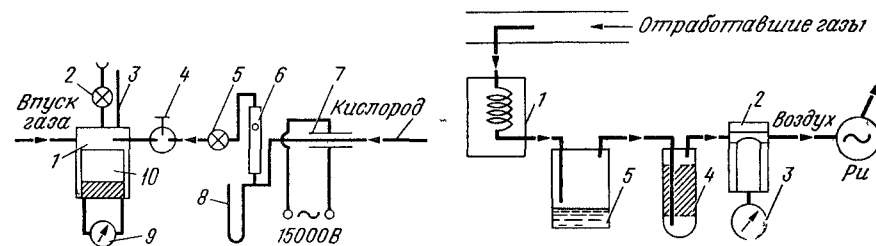


Рис 6 Хемилуминесцентный анализ затора окиси азота

1 — реакционная камера давление 670 Па, 2 — вакуумный насос, 3 — ртутный манометр, 4 — игольчатый клапан, 5 — отсечной клапан, 6 — расходомер, 7 — ртутный манометр, 8 — кислород, 9 — амперометрический датчик, 10 — фоторазмножительная трубка.

Рис 7 Система отбора газовых проб для определения содержания кислорода

1 — большая водяная баня при комнатной температуре, 2 — амперометрический датчик кислорода, 3 — шкала указывающая содержание кислорода, 4 — дегидрирующий осушающий агент или фильтр, 5 — осажденная вода.

хлористого калия. Для тарировки датчика использовался комнатный воздух. Перед попаданием в анализатор проба газа подвергалась сушке путем охлаждения до комнатной температуры, затем из нее удалялась сконденсировавшаяся вода и для окончательной сушки она пропусклась через осушитель Дегидрит.

Опережение зажигания устанавливалось таким образом, чтобы достигался оптимальный крутящий момент. В связи с тем, что зависимость крутящего момента от опережения зажигания вблизи оптимального положения коленчатого вала незначительна, установка опережения зажигания производилась по изменению давления в цилиндре. Увеличение давления газов всегда можно было четко определить. Опережение зажигания устанавливалось в момент совпадения половины траектории кривой роста давления с в.м.т. коленчатого вала. Эта методика позволяла добиваться такой же точности установки, как и при обычной методике, применяемой для получения максимального крутящего момента, но с более воспроизводимыми результатами. Увеличение давления при работе на водороде происходило обычно довольно быстро, и поэтому было очень легко находить точку, соответствующую половине траектории роста давления.

Результаты испытаний и их анализ. В этом разделе рассматриваются результаты испытаний по мощности, экономичности и содержанию в отработавших газах NO_x и их сравнение с вычислениями, полученными на модели. Комментируется также относительное содержание в отработавших газах перекиси водорода. Рассматриваются бедные топливно-воздушные смеси с водородом при его непосредственном впрыске в двигатель, а также наблюдения, касающиеся недостатков при работе на водороде, связанных с быстрым увеличением давления, преждевременным воспламенением и детонацией.

Мощность, экономичность, эмиссия. На рис 8 представлены средние эффективные давления в зависимости от

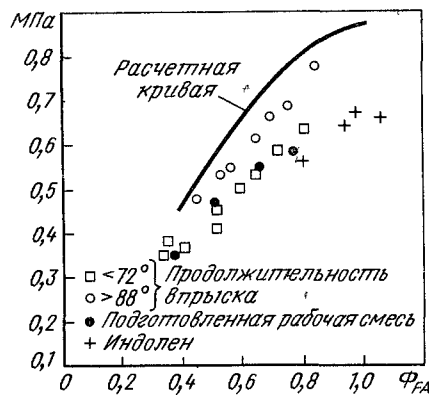


Рис 8 Влияние Φ на среднее эффективное давление (P_e) двигателя CFR (степень сжатия 8, 1200 об/мин, головка Отто)

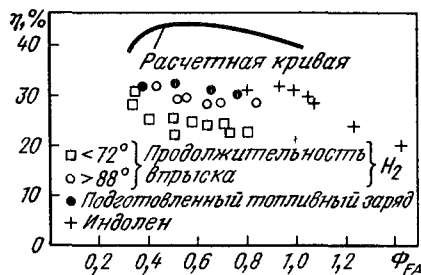


Рис 9 Влияние Φ на индикаторный термический к п д (η) двигателя CFR

коротком впрыске происходило неудовлетворительное образование топливно-воздушной смеси и неполное сгорание, в результате чего достигалась меньшая мощность, чем ожидалось. Проблема смесеобразования рассматривается в следующем разделе.

На рис 9 приводятся полученные методом вычисления и измерения термические индикаторные к п д двигателя в зависимости от коэффициента избытка топлива для тех же условий, что и на рис 8. Максимальный вычисленный термический к п д для водорода достигается при коэффициенте избытка топлива, равном примерно 0,4. Могут использоваться и более бедные смеси, однако на более бедных смесях снижается термический к п д двигателя вследствие большей продолжительности горения и низкой температуры пламени. Измеренные индикаторные термические к п д для вариантов с водородом, предварительно смешан-

коэффициента избытка горючего в рабочей смеси Φ , определенное измерением и расчетным путем. Приводятся также некоторые сведения, полученные на эталонном бензине (индолене). Предсказанные средние эффективные давления, приводимые на рис 8, были вычислены для предварительно подготовленного топливного заряда при давлении во всасывающей системе, равном 1 атм. Эти значения выше измеренных значений главным образом вследствие того, что в расчетной модели не учитывается теплопередача. Как расчетные данные, так и результаты испытаний свидетельствуют о тенденции увеличения мощности на богатых смесях с недросселированной системой регулирования состава рабочей смеси.

При непосредственном впрыске топлива в цилиндр и увеличении периода впрыска достигался, значительный прирост мощности по сравнению с работой на предварительно подготовленной водородной или бензиновой топливной смеси, что и ожидалось в результате анализа идеального топливно-воздушного цикла. При непосредственном

ным с воздухом, находились в пределах 25—35% и были примерно такими же, как и индикаторные термические к п д при работе на бедных бензиновых смесях. Непосредственный впрыск водорода в цилиндры вызывал снижение термического к п д вследствие потерь, связанных с неполным сгоранием. Кроме того, наблюдалось соответствие между сокращением периода горения и снижением термического к п д.

Вычисленные термические к п д выше измеренных в основном благодаря действию теплопередачи. Эта разница несколько больше, чем обычно приписывается влиянию теплопередачи. Возможно, что потери от дросселирования происходят в относительно небольшом всасывающем коллекторе двигателя CFR или в клапане. Сравнение измеренных и вычисленных потоков воздуха указывало бы на размеры потерь от такого дросселирования, но этого не делалось потому, что не было данных относительно вычисленного воздушного потока.

На рис 10 и 11 представлено содержание окислов азота в отработавших газах в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Мольная доля NO , приводимая на рис 10, была вычислена с помощью ранее описанной модели и измерена в нашей лаборатории во время испытаний подготовленных смесей на двигателе CFR, а также в исследовательских лабораториях фирмы «Дженерал моторс» [7]. Получилась довольно хорошая сходимость между измеренными и вычисленными концентрациями. Тем не менее измеренные значения, очевидно, лучше соответствовали зависимости, характеризующей несколько более богатые смеси, чем предсказанные значения. В работе [6] предполагалось, что такой сдвиг может быть вызван влиянием теплопередачи, что не учитывалось при расчете модели.

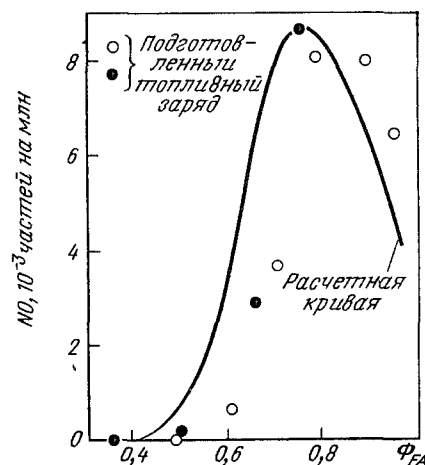


Рис 10 Влияние Φ на концентрацию окислов азота (в пересчете на NO) для двигателя CFR

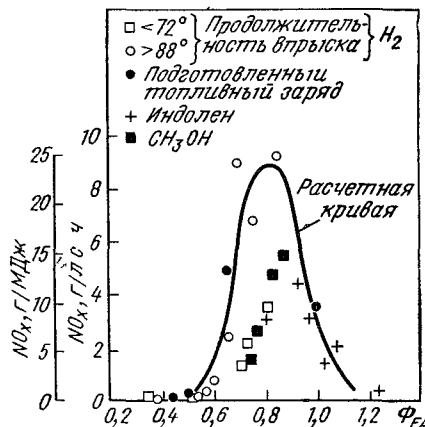


Рис 11. Влияние Φ на содержание окислов азота (в пересчете на NO) для двигателей CFR при работе на водороде, бензине или метаноле

На рис 11 приводятся расчетное и измеренное содержание летучих загрязнений (содержание по массе, отнесенное к единице снимаемой мощности). Содержание измерялось при непосредственном впрыске водорода в цилиндр двигателя и при водороде, бензине и метаноле, предварительно смешанными с воздухом. В отличие от рис 6 предсказанные зависимости удельного содержания ложатся значительно ниже максимальных значений, полученных изменением, что обусловлено проявлением расчетной мощности в знаменателе использованных формул. Таким образом, модель позволяет оценивать концентрации NO_x в отходящих газах, но при этом занижаются значения удельного содержания в связи с завышенной мощностью двигателя (см рис 8).

Величина загрязнения при увеличении периода впрыска водорода имеет тенденцию повышаться, как и в случае подготовленных смесей водорода с воздухом. При коротком периоде впрыска, сопровождающемся неполным сгоранием, содержание NO_x снижалось. Содержание NO_x для бедной и нормальной смесей при работе на бензине или на метаноле оказалось значительно ниже, чем при работе на водороде. Это согласуется с результатами, полученными Стебаром и Парксом [7], у которых с таким же коэффициентом избытка воздуха и на том же двигателе для водорода также получалось значительно более высокое содержание NO_x по сравнению с изоктаном. Следовательно, неверно ранее высказывавшееся мнение [11] о том, что при работе на водороде содержание NO_x будет меньше, чем при работе на углеводородном топливе. Безусловно, очень низкое содержание NO_x может быть получено при работе на водороде на бедной смеси (Φ ниже 0,6).

При работе двигателя на водороде в отработавших газах [12, 13] была обнаружена также перекись водорода (H_2O_2). Условия эксплуатации двигателя в этих испытаниях не устанавливались, но водный конденсат отработавших газов содержал 220 [12] и 800 частей на миллион [13] H_2O_2 . Поскольку на долю воды приходится примерно 30% объема отработавших газов, концентрация H_2O_2 в них будет, очевидно, составлять около одной трети концентрации перекиси водорода в водном конденсате.

Образование перекиси водорода связано с наличием гидроперекисного радикала ($\text{HO}\cdot$), который обычно образуется лишь в очень незначительном количестве при высокотемпературном окислении водорода. Для образования необходимого количества такого радикала ($\text{HO}\cdot$) требуются гипотетически низкие области температур (например, резкое охлаждение стенок цилиндра и других зон горения). Образование радикала $\text{HO}\cdot$ может проходить по термомолекулярной реакции $\frac{1}{2} \text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}\cdot + \text{M}$ $\Delta H_{298}^0 = -197$ кДж/моль.

После образования $\text{HO}\cdot$ перекись водорода получается путем рекомбинации $\text{HO}\cdot + \text{HO}\cdot + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{M}$ $\Delta H_{298}^0 = -178$ кДж/моль.

Для установления потенциально возможной концентрации H_2O_2 в отработавших газах требуется проведение дальнейших исследований и испытаний. Если окажется, что H_2O_2 образуется в количествах, нежелательных с точки зрения охраны окружающего атмосферного воздуха от загрязнения, то может потребоваться установка на автомобилях термических или каталитических преобразователей, в которых перекись водорода разлагалась бы на H_2O и $\frac{1}{2} \text{O}_2$.

Ограничение смешения образования при непосредственном впрыске в цилиндр двигателя. Для определения полноты сгорания использовались данные, получаемые с помощью кислородного анализатора. Типичные значения процентного содержания кислорода в отработавших газах в зависимости от коэффициента избытка воздуха Φ в рабочей смеси представлены на рис 12.

Линия «отсутствие горения» означает разбавление кислорода воздуха водородом. Соответствующая кривая для бензина (индолена) не показана, но она проходит по верхней границе рисунка (21% O_2). Кривые «полное сгорание» свидетельствуют о том, что после полного сгорания и удаления всей воды из продуктов сгорания остался неиспользованный кислород. Результаты испытаний, полученные при непосредственном впрыске топлива в цилиндр, укладываются между этими двумя кривыми и свидетельствуют о том, что сгорание было неполным. При сравнительных испытаниях с предварительно подготовленными смесями воздух—водород и воздух—бензин сгорание было наиболее полным (см рис 12). Как показано на рис 13, дальнейшие эксперименты с впрыском самого водорода позволили установить, что сгоревшая часть топлива (определенная на основании измерения содержания кислорода в отработавших газах) по мере удлинения периода впрыска возрастала. Это также свидетельствовало о тенденции более полного сгорания по мере увеличения периода впрыска. Однако эта тенденция не была ярко выраженной и доля сгоревшего водорода зависела в основном от продолжительности впрыска. При продолжительности впрыска 88° и более израсходованная доля кислорода

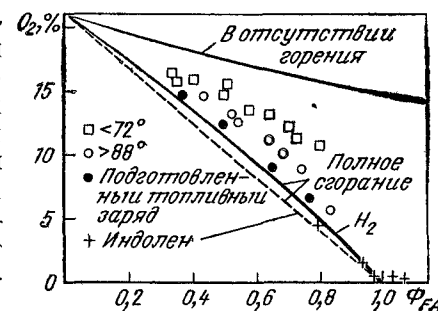


Рис 12 Влияние Φ на содержание кислорода в отработавших газах (сухой образец)

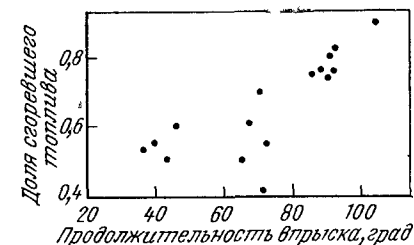


Рис 13 Доля сгоревшего водорода при испытаниях в двигателе CFR с непосредственным его впрыском в зависимости от продолжительности впрыска

была близка к 0,8, в то время как при продолжительности впрыска менее 72° она составляла от 0,4 до 0,7.

Полагают, что причиной неполного сгорания является недостаточное перемешивание водорода с воздухом. К аналогичным выводам пришел Оэмихен [14], который провел обширные испытания на водородном двигателе с непосредственным впрыском топлива в цилиндры. Он установил, что при радиальном впрыске топлива термические к. п. д. были низкими. После изменения положения ориентации водородной форсунки таким образом, чтобы водород впрыскивался тангенциально, Оэмихену удалось получить очень высокие индикаторные термические к. п. д. (например, 54% при степени сжатия 15,4, соотношении в рабочей смеси водорода 0,4 и частоте вращения 1500 об/мин). Учитывая эти результаты, в наших дальнейших планах предусматривается изменение направления впрыска от радиального к тангенциальному и проведение дополнительных испытаний по регулированию опережения впрыска. Для того, чтобы непосредственный впрыск водорода в цилиндры стал перспективным способом, необходимо решить проблему перемешивания. Работы Оэмихена свидетельствуют о возможности решения этой проблемы и достижения в подходящих условиях индикаторного термического к. п. д. порядка 50%.

Процесс воспламенения. Твердо установлено, что водородное топливо в двигателе склонно к преждевременному воспламенению под действием реакций, возникающих на горячих поверхностях. Эти реакции могут происходить на поверхностях взвешенных частичек либо на поверхностях отложений у стенки цилиндров.

Преждевременное воспламенение приводит к неравной работе двигателя и обратной вспышке в карбюратор. Избежать преждевременного воспламенения можно путем поддержания стенок цилиндров в очень чистом состоянии и путем исключения любых горячих частиц, образующихся на выпускных клапанах и на свечах зажигания.

Преждевременного воспламенения можно избежать также путем перемешивания водорода с воздухом по возможности в более поздний момент такта двигателя или путем введения водорода способом, предложенным Свэйном и Эдтом [15]. Однако, как было нами установлено при испытаниях на двигателях CFR с головкой Отто, все эти меры сами по себе не гарантируют предотвращения преждевременного воспламенения. Так, например, при степени сжатия 8 и 1200 об/мин мы можем увеличивать коэффициент избытка воздуха примерно до 0,8. Зависимости давление — время, полученные для этих условий, были вполне равными. При дальнейшем увеличении коэффициента избытка воздуха выше 0,8 возникало преждевременное воспламенение, о чем свидетельствовало постепенное увеличение давления вследствие сгорания водорода в период, близкий ко времени начала его впрыска. При этом опережение впрыска составило примерно 15 с. При сни-

жении коэффициента избытка воздуха через 15 с преждевременное воспламенение прекращалось. Мы объясняем это постепенным охлаждением источника преждевременного воспламенения.

Причиной детонационного горения в цилиндре двигателя обычно считают самовоспламенение газовой смеси в результате сжатия до подхода фронта пламени. Оэмихен [14] определил предельные значения степени сжатия, избытка горючего и частоту вращения вала двигателя, при которых происходит бездетонационное сгорание. Он показал, что бездетонационная работа двигателя при достаточно высокой частоте вращения с высокой степенью сжатия возможна при содержании горючего в рабочей смеси в широких пределах. Так, согласно его данным, бездетонационная работа двигателя обеспечивалась при степени сжатия 10 на различных коэффициентах избытка воздуха при условии, что частота вращений вала двигателя была выше 750 об/мин. В его опытах при различных условиях не имело место ни преждевременное воспламенение, ни самовоспламенение.

Воспламенение от сжатия в водородных двигателях, по-видимому, не происходит. Согласно определению, такое воспламенение вызывается самовоспламенением смеси в результате сжатия независимо от поверхностного воспламенения. В последних исследованиях, выполненных совместно с лабораторией реактивных двигателей, мы доводили степень сжатия до 29. Нам не удалось добиться воспламенения водорода от сжатия. Для этих исследований двигатель CFR с дизельной головкой был модифицирован путем установки вставки в предкамеру сгорания. Давление и температура смеси после того, как степень сжатия достигла 29, являются такими, что если смесь оставить в невозмущенном состоянии, то, безусловно, она взорвется. Однако в двигателе смесь вскоре вновь расширяется. Время задержки воспламенения является, по-видимому, слишком длительным по сравнению с фактической продолжительностью процесса.

Отличные характеристики сгорания, как было установлено в работе, упомянутой в предыдущем разделе, могут быть получены путем применения калильной свечи зажигания. Для этого была использована калильная свеча зажигания патронного типа Чемпион AG 40, установленная вблизи топливной форсунки. В таких условиях сгорание водорода происходило очень скоро после впрыска. Горение начинается после поворота коленчатого вала примерно на 10° с момента начала впрыска. Результаты дают возможность надеяться, что дизельные двигатели могут быть приспособлены для работы на водороде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании расчетных и экспериментальных исследований показано, что водород может быть подходящим топливом для поршневых двигателей. Широкие пределы воспламенения водородно-воздушных смесей позволяют влиять на мощность двигате-

ля путем регулирования без участия дросселя. Это дает возможность значительно повысить экономичность работы двигателя на водороде по сравнению с работой на изоктане, для которого необходимо дросселирование

Несмотря на то, что низкая плотность водорода ограничивает наземную мощность двигателя при работе на предварительно подготовленном топливном заряде, для значительного повышения плотности топливного заряда и соответственно полезной мощности можно воспользоваться непосредственным впрыском водорода в цилиндры двигателя. Однако при непосредственном впрыске водорода в цилиндры необходимо принимать меры предосторожности для предотвращения неполного сгорания, возможного вследствие недостаточного перемешивания топлива с воздухом. Настоящие испытания показали, что запаздывание впрыска по радиальному направлению в цилиндры ведет к неполному сгоранию, в то время как при впрыске на ранней стадии такта происходит почти полное сгорание водорода

Оксид азота в отработавших газах водородных двигателей образуется по тем же термохимическим законам, что и в двигателях, работающих на углеводородных топливах. Для близких к стехиометрической смеси загрязнение на водороде значительно выше, чем, при работе на углеводородных топливах. Однако при работе на бедных смесях на водородном топливе можно добиться значительного снижения содержания NO_x . Кроме того, благодаря большей скорости сгорания водорода, содержание в отработавших газах NO_x ограничивается в большей степени без ущерба для экономии топлива. Таким образом, широкие возможности водорода как топлива благодаря его характеристикам сгорания позволяют разработать конструкцию двигателя, на котором можно было бы свести к минимуму эмиссии NO_x .

ОБСУЖДЕНИЕ

Р. К. Пифли (Университет Санта-Клара) Мне кажется, что Ваша модель может дифференцированно характеризовать использование предварительно подготовленных топливных смесей и непосредственный впрыск водорода. Но на приводимом графике представлена только одна кривая. Можете ли Вы объяснить это?

Мак-Лиан Нам кажется, что нет большой разницы в термических к. п. д. двигателя для вариантов с непосредственным впрыском и с предварительным смесеобразованием. Однако что касается получаемой мощности, то здесь разница большая.

Пифли. А как обстоит дело с NO_x ?

Мак-Лиан Содержание NO_x при непосредственном впрыске имеет тенденцию к увеличению вследствие более высоких температур.

Ф. А. Уильямс (Калифорнийский университет, Сан-Диего) Какого рода соотношения в скорости пламени наблюдались?

Мак-Лиан Мы считаем, что скорости турбулентного и ламинарного пламени коррелируются. С помощью формулы Семенова нами были получены стехиометрические эффекты для ламинарной скорости пламени. Затем путем исследования продолжительности сгорания и оптимального опережения зажигания мы рассчитали соответствующую постоянную.

П. Т. Викерс (исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс») Рассматривая продолжительность сгорания, Вы пользовались определением продолжительности сгорания, отличающимся от применяемого нами. Мы считаем, что продолжительность сгорания — это время от начала выделения значительного количества энергии до момента выделения 99% химического тепла. Это означает, что должно быть некоторое время между моментом, когда воспламеняется свеча зажигания, и временем, в течение которого ведется наблюдение за выделением тепла на Вашей кривой давления. Кроме того, некоторое количество химического тепла может быть выделено за пределами пикового давления из-за поворота коленчатого вала. При работе на водороде эти периоды времени очень малы. Поэтому не кажется ли Вам Ваше определение неправомерным?

Мак-Лиан. Если отвечать на этот вопрос коротко, то да. Но следует сказать, что во время вычисления изменения давлений в цилиндре с такими скоростями пламени действительно наблюдается как бы задержка воспламенения, которую нельзя приписать действительно задержке, а можно объяснить тем, что первая часть топливного заряда, сгорая, вызывает лишь небольшое увеличение давления. Получается некоторый период задержки, который соответствует периоду между воспламенением топливного заряда и началом значительного увеличения давления в цилиндре.

АЗОТОВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА

Е. У. ШМИДТ

Ракетная исследовательская корпорация, Редмонд, штат Вашингтон, США

Оценивается возможность использования азотоводородных соединений после 2000 г. в качестве автомобильного топлива. Азотоводородное топливо состоит из азота и водорода. Основными видами азотоводородного топлива являются гидразин (N_2H_4) и аммиак (NH_3). Возможность использования аммиака в качестве топлива установлена другими исследователями. У него оказались плохие характеристики сгорания. Относительно использования гидразина пока не было опубликовано ни одной работы, но предполагается, что скорость сгорания гидразина в воздухе выше скорости сгорания аммиака и углеводов. В связи с этим гидразин должен сгорать быстрее и полнее. При полном сгорании и после удаления оксидов азота, которые могут образоваться, азотоводородное топливо не будет загрязнять окружающей атмосферы.

До сих пор рассматривалась возможность использования в качестве автомобильного топлива аммиака и гидразина только в чистом виде. Однако наи-

больших преимуществ для азотоводородного топлива можно достичь при использовании бинарных или тройных смесей гидразина с аммиаком¹ и (или) с водой, температура замерзания которых ниже —54°C. Рассматривается также выбор критериев для азотоводородных топливных смесей.

В настоящей статье обобщены работы по подготовке азотоводородного топлива, его производству, по возможности его использования в автомобильных двигателях, транспортированию, хранению и перекачке, по безопасности в обращении с ним и его совместимости с различными материалами. Оценивается химическое строение азотоводородов в сравнении с другими необычными топливами для периода после 2000 г. Приводятся результаты предварительных испытаний в Корпорации по исследованию ракет с гидразином и гидразиновыми смесями в одноцилиндровом двигателе внутреннего сгорания.

Введение. Термин «азотоводородное топливо» образовался по аналогии с более знакомым «углеводородное топливо», к которому относятся применяемые в настоящее время бензин и дистиллятные топлива. По существу в азотоводородном топливе углерод замещен азотом. Азот является основным компонентом воздуха, которым мы дышим, и имеется в природе в большем количестве, чем ископаемое топливо; которые в настоящее время служат основным источником углерода.

Из всех теоретически возможных соединений азота и водорода только два соединения являются достаточно стабильными и представляют интерес для рассмотрения в качестве возможного автомобильного топлива: аммиак и гидразин. Остальные азотоводороды очень нестабильны и непригодны для использования в качестве топлива. Аммиак, являющийся низшим членом азотоводородов, так же, как и метан—низшим членом углеводородов, не обладает подходящими свойствами для использования в качестве автомобильного топлива. В то же время вещества, молекулы которых имеют больше, чем один, атом углерода или азота (соответственно бензин или гидразин), являются более перспективными топливами. Их, в частности, легко хранить и транспортировать, потому что они при обычной температуре представляют собой жидкости.

Аммиак и гидразин ранее предлагались в качестве автомобильного топлива [1, 2]. Интенсивные экспериментальные исследования аммиака в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания были проведены [2, 3, 4, 5], но относительно испытаний гидразина сообщений пока не было. Основываясь на работах по использованию гидразина в качестве ракетного горючего, Корпорация по исследованию ракет провела экспериментальную и аналитическую оценку возможности использования гидразина в качестве автомобильного топлива. Некоторые из этих испытаний носят всего лишь предварительный характер, но полученные результаты свидетельствуют о том, что работать в этом направлении имеет смысл.

В одном из ранних испытаний использовался двигатель самолета модели Кокс, который эксплуатировался как с подачей, так и без подачи воздуха на однокомпонентном ракетном топливе. В то время предполагалось, что таким образом гидразин будет использоваться в качестве топлива для лунохода. Гидразин обла-

дает свойством не только сгорать, как бензин, но и разлагаться в отсутствие воздуха в регулируемом режиме, что дает возможность использовать его в различных вариантах. В будущих автомобилях эта особенность гидразина также может быть использована.

В настоящее время единственной публикацией, касающейся использования гидразина в наземных системах, является сообщение об испытаниях дистанционно управляемого исследовательского самолета с названием «Мини-Сниффер» [6]. Этот самолет мог достигать высоты 30,4 км и служил для исследования содержания в верхних слоях атмосферы озона и загрязнений. Гидразин использовался также в сверхзвуковом транспортном самолете «Конкорд» и на вспомогательных силовых установках космической челночной ракеты «Шаттл».

Причины возникновения потребности в азотоводородном топливе. Предложение об использовании вместо углеводородного азотоводородного топлива сделано на основании того, что разведанные запасы угля в США могут удовлетворить не только потребность страны в энергии, но и в производстве синтетического топлива на многие сотни лет. Однако возникает вопрос, правильно ли будет с точки зрения воздействия на окружающую среду добыть и сжечь все ископаемое топливо, используя его только для энергетических целей. Очень скоро не только нефть, но и уголь, может быть, придется резервировать для использования в химической промышленности, для которой не так легко найти подходящие источники сырья, как в энергетике. Доступность относительно дешевой электроэнергии, которую можно получать с помощью ядерной или солнечной энергий, изменит энергетическую картину в пользу синтетических неископаемых топлив, которые при наличии таких источников энергии могут вырабатываться из воды и воздуха.

Более того, мы не должны при рассмотрении этого вопроса исходить только из возможностей США, где имеются крупные запасы угля. В других странах раньше, чем в США, может возникнуть нехватка топлива. И в этом случае в экономическом и политическом планах целесообразно иметь разработанные технологические процессы производства энергии из неископаемых источников и экспортировать их в другие страны, в которых эра использования синтетического топлива должна наступить раньше.

Прогноз потребности топлива для транспорта. На рис. 1 приводится прогноз производства и потребления топлива для транспорта в США и в мире. Если бы потребление топлива транспортом США продолжало увеличиваться таким же темпом, как и в настоящее время, то в 2020 г. оно бы превзошло мировое потребление, что, очевидно, нереально.

В работе [7] приводятся прогнозы добычи нефти в США на ближайшие годы.

В другой работе [8] приводятся прогноз производства неистощаемого топлива и представляющий для нас большой интерес прогноз производства азотоводородного топлива (рис 2). Несмотря на то, что масштаб времени на этом рисунке уплотнен (особенно по отношению к продолжительности периода производства жидкого топлива из угля), он может служить иллюстрацией того, что после периода производства жидкого топлива из угля наступит время, когда транспорт станет работать на неистощаемом синтетическом топливе. И, возможно, что сейчас не рано начинать заниматься этими вопросами с тем, чтобы можно было растянуть на больший срок ресурсы ископаемого топлива.

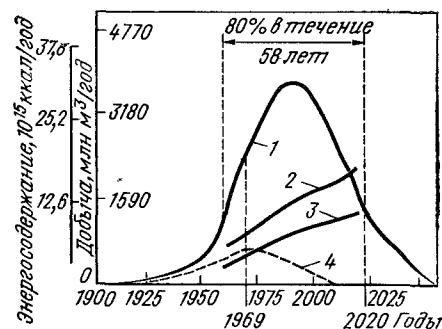


Рис 1 Мировые нефтяные ресурсы и потребность США:

1 — мировая добыча, 2 — суммарная потребность США в нефти, 3 — потребность США в нефти для транспортных средств, 4 — добыча нефти в США

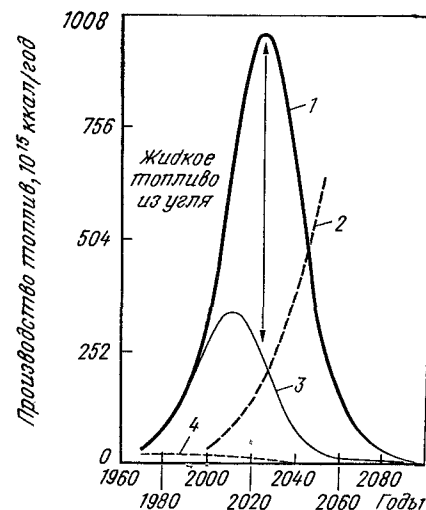


Рис 2 Производство ископаемого и неистощаемого топлива (в мире):

1 — жидкое топливо (всего из ископаемых источников энергии); 2 — неистощаемое синтетическое топливо, 3 — жидкое ископаемое топливо, 4 — уголь, используемый в твердом виде

Таблица 1. Физические свойства необычных топлив

Параметр	Метанол	Этанол	Жидкий аммиак	Гидразин	Жидкий водород	Для сравнения n-октан
Температура плавления, °C	-97,78	-114,44	-77,72	1,5	-259,22	-56,78
Температура кипения, °C	64,72	78,89	-33,33	114,22	-252,78	125,62
Теплота образования при 25°C, ккал/моль	-49,465	-54,64	-23,87 (газ)	-11,07	-18,828 (жидкость)	-51,966
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	4 761	6 393	4 186	3 983	27 736	10 606
Высшая теплота сгорания, ккал/кг	5 418	7 078	5 112	4 638	32 954	11 441
Теплота парообразования при температуре кипения в нормальных условиях, ккал/кг	263,13	100,13	326,80	323,91	106,56	71,87
Плотность жидкости при 25°C, кг/м³	0,7821	0,7894	0,6819	1,0037	0,0708 (при -253,3°C)	0,69849
Упругость паров при 25°C, мм рт.ст.	58,674	21,590	3693,16	6,960	—	7,366

Учитывая, что автомобиль имеет ограниченный объем, плотность топлива служит для него важным оценочным критерием. Создание более громоздких автомобилей, несомненно, приведет к дополнительным аэродинамическим потерям, которые во многих случаях не учитываются. Поэтому для более реальной оценки качества необычных топлив необходимо сравнивать их объемную теплоту сгорания, как это показано на рис. 3. На этом рисунке сравнивается теплота сгорания в килокалориях на литр, а не на килограмм. Как видно, бензин с точки зрения энергетической плотности действительно является наиболее желательным топливом. Но вместе с тем рядом с бензином стоит гидразин, являющийся основным азотоводородным топливом. По плотности он превосходит усиленно предлагаемый метанол. К сожалению, температурные пределы жидкого состояния гидразина очень близки к температурным пределам жидкого состояния воды. Температура замерзания гидразина равна 1,7°C, что налагает ряд ограничений при его использовании в различных географических зонах.

В связи с высокой температурой замерзания гидразина и другими его эксплуатационными свойствами к нему целесообразно добавлять антифриз для того, чтобы его можно было исполь-

зовать как автомобильное топливо. Выбор антифриза ограничивается жидкостями, смешивающимися с гидразином и не вызывающими неприемлемые проблемы загрязнения окружающей среды. Наиболее эффективным антифризом для гидразина является вода и (или) аммиак. Обе эти добавки не только понижают температуру замерзания гидразина, но понижают также объемную теплоту сгорания (фактор нежелательный). В Корпорации по ракетным исследованиям были испытаны двойные и тройные смеси гидразина с аммиаком и (или) водой в зависимости от требовавшейся температуры замерзания.

На рис. 4 показана диаграмма температуры замерзания тройной смеси гидразин—аммиак—вода. Минимальная температура для ряда условий применения топлив в вооруженных силах равна -54°C . Поэтому для испытания была выбрана тройная смесь TF-1, состоявшая из 64% гидразина, 10% аммиака и 26% воды. TF-1 также показана на диаграмме. Ее теплота сгорания при равных объемах на 20% меньше, чем у метанола. Однако существует определенная зависимость между энергоемкостью и температурой замерзания. При более высокой температуре чем -57°C могут быть достигнуты и более высокие энергоемкости смеси.

TF-1 и подобные низкотемпературные смеси выбирались в области максимальной плотности тройной смеси гидразин—аммиак—вода — неожиданное, но желательное преимущество при выборе топливных смесей. Желательно было бы иметь также аналогичные тройные диаграммы для этих синтетических топлив и по октановым числам. Однако такими сведениями мы не располагаем. Име-

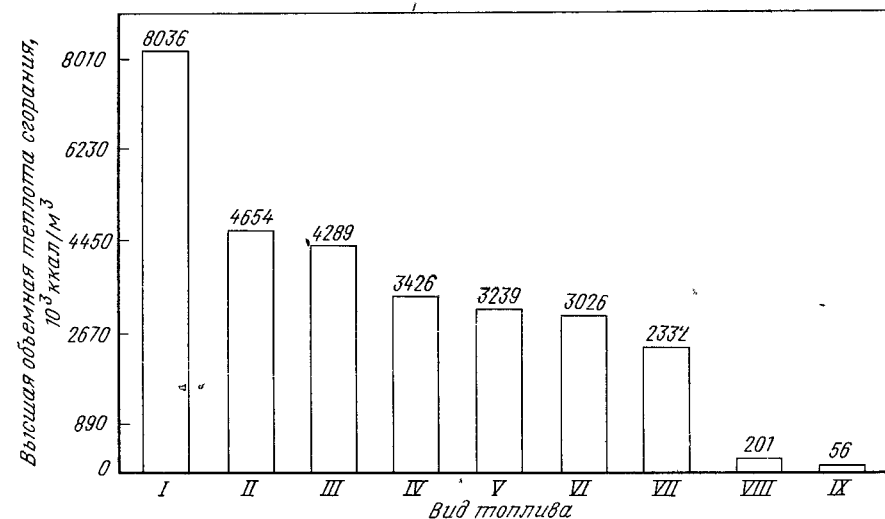


Рис 3 Сравнение теплотворной способности необычных топлив
 I — октан, II — гидразин, III — метанол (получаемый из угля), IV — смесь TF-1, V — аммиак, VI — гидразингидрат, VII — жидкий водород, VIII — природный газ (при 0,14 МПа), IX — газообразный водород (при 0,14 МПа)

ются лишь предварительные данные, согласно которым смесь чистого гидразина с воздухом характеризуется низким октановым числом и склонностью к детонации. Эта тенденция может быть снижена путем добавления воды и (или) аммиака. Известно, что у аммиака очень высокое октановое число. Следовательно, на стороне $\text{N}_2\text{H}_4\text{—NH}_3$ диаграммы мы располагаем целой гаммой октановых чисел от очень низких до очень высоких. На стороне диаграммы $\text{N}_2\text{H}_4\text{—H}_2\text{O}$ октановое число возрастает до тех пор, пока композиция станет негорючей из-за преобладания воды. Следовательно, получение заданного октанового числа возможно для смесей соответствующего состава. Здесь также имеется некоторая зависимость между октановым числом и энергоемкостью смеси.

При оценке азотоводородного топлива и, в частности, гидразина как соединения, содержащего водород и источник энергии, важное значение имеет то, что содержание водорода в молекуле гидразина в 2 раза больше, чем в молекуле сжиженного водорода $0,12 \text{ г/см}^3$ по сравнению с $0,07 \text{ г/см}^3$. Далее, в связи с тем, что гидразин обладает положительной энтальпией, его теплота сгорания выше теплоты сгорания смеси, состоящей из 12,5% водорода и 87,5% азота. Поэтому азот в гидразине является не просто разбавителем водорода.

Получение азотоводородного топлива. Аммиак в настоящее время производится в больших количествах и находит применение главным образом в качестве удобрения. В 1973 г. в США было произведено 14,06 млн. т, а в 1972 г. мировое производство составляло 57,60 млн. т аммиака. Ежегодно вводятся дополнительные мощности по производству аммиака, однако остаются неясными возможности использования в качестве сырья для производства аммиака природного газа и лигроина. Очевидно, при производстве синтетического топлива целесообразнее было бы эти виды сырья использовать для получения жидкого углеводородного топлива, а не для производства аммиака. То же самое относится и к гидразину, получаемому в настоящее время из аммиака, который, в свою очередь, получают из углеводородного сырья.

Поэтому возможность использования азотоводородов в качестве топлива в будущем связана с созданием таких методов их синтеза, которые позволили бы получать гидразин не из аммиака. Наиболее обещающим направлением в этой области является химическая реакция, называемая фиксацией азота. Фиксация азота происходит в естественных условиях бактериями, живущими

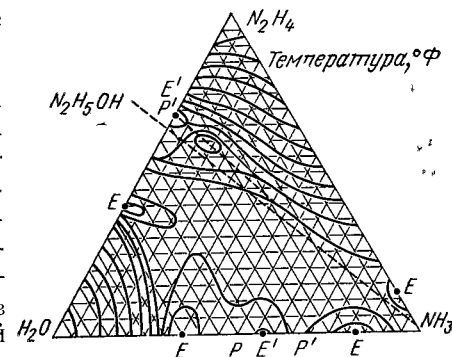


Рис 4 Диаграмма замерзания тройной смеси гидразина-аммиака-воды

на корнях некоторых растений (например, leguminosae), что играет важную роль в поддержании азотного равновесия в почвах сельскохозяйственных угодий. Попытка воспроизвести эту реакцию «в стекле» лабораторных условий до последних лет была безуспешной. Главной целью этих опытов был поиск новых методов получения аммиака. Удивительно, что вначале исследователями вместо аммиака был получен гидразин, который рассматривался нежелательным побочным продуктом. Дополнительные исследования в этом направлении позволяют, очевидно, разработать метод синтеза гидразина, используя в качестве сырья буквально воду и аммиак. При этом для получения одного из реагентов требуется электроэнергия. До сего времени реакция фиксации азота была продемонстрирована только в пробирке [9], и пока будет осуществлено ее промышленное внедрение, пройдет много лет. Можно полагать, что электроэнергию, которая требуется для осуществления этого процесса, в начале следующего века можно будет получать с помощью ядерной энергии.

В настоящей работе производство гидразина в США составляет 10 433 т, но лишь незначительная часть используется в виде безводного гидразина. Гидразин в основном перерабатывается в другой промежуточный продукт для производства гербицидов и пенообразующих агентов. Современные мощности США по производству гидразина совершенно недостаточны для производства его в масштабах, удовлетворяющих потребность в топливе для транспорта. По существу эти мощности недостаточны даже для удовлетворения быстро растущих потребностей в новых областях применения. Поэтому перевод транспорта на азотоводородное топливо потребует сооружения новых больших производственных мощностей.

Хранение и транспортирование азотоводородного топлива. Поскольку персонал, который будет работать с необычными топливами, должен обращаться с ними так же, как и с бензином, необходимо тщательно изучить потенциальную их опасность. С другой стороны, во время оценки опасности заменителей бензина необходимо иметь в виду, что бензин, несмотря на его широкое распространение, является также опасным химическим веществом, особенно в отношении его воспламеняемости. И, несмотря на то, что при вдыхании или попадании на кожу азотоводороды агрессивнее действуют на организм человека, чем бензин, есть надежда, что с помощью соответствующих инструкций по обращению с ними можно обеспечить безопасность. Аммиак и гидразин уже давно применяются в сельском хозяйстве и в промышленности. При работе с ними имели место несчастные случаи, однако их число в пересчете на количество продукта меньше, чем несчастных и смертельных случаев, имевших место при обращении с бензином. Такое сравнение не должно делаться только с учетом несчастных случаев. Необходимо иметь в виду и количество продуктов, с которыми приходится иметь дело. Согласно нашим прогнозам, если транспортная система будет переведена на

азотоводородное топливо и люди будут к этому соответствующим образом подготовлены, то количество несчастных случаев, обусловленных работой с таким топливом, снизится. В частности, в связи с сильным запахом аммиака оператору легче обнаружить его утечку. Многочисленные несчастные случаи, которые происходят во время слива бензина из автомобиля для его использования по другому назначению (для чистки, подогрева перед пуском), не будут иметь места.

Тщательная оценка опасности азотоводородных заменителей бензина должна включать исследование их токсичности (их действия на организм при вдыхании, проглатывании и попадании на кожу) и воспламеняемости. Для оценки действия на организм при вдыхании обычно пользуются показателями предельно допустимой концентрации (ПДК), установленной Американской конференцией специалистов промышленной гигиены, и упругостью паров вещества. ПДК устанавливается для персонала, работающего с продуктом в течение восьмичасового рабочего дня или сорокачасовой рабочей недели. Эти данные не могут быть отнесены к населению в целом, так как степень контакта с продуктом у различных людей неодинакова. С другой стороны, население не будет вдыхать продукт в таких количествах, как оператор автозаправочной станции. Сравнение возможных несчастных случаев, основанное на величине ПДК, приводит к неправильным оценкам, потому что одно соединение может быть менее летучим, чем другое. Вместо этого показателя для оценки несчастных случаев необходимо пользоваться так называемым индексом несчастных случаев, который получается путем деления упругости паров на ПДК.

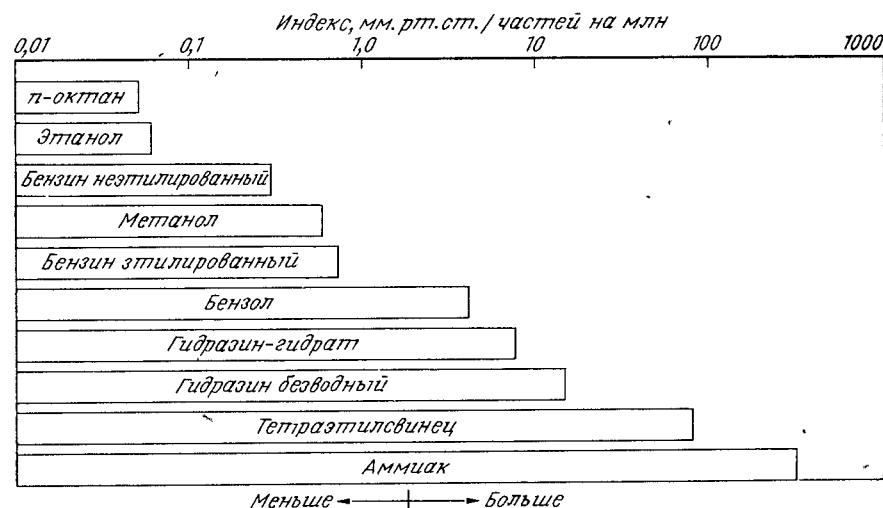


Рис. 5. Индекс опасности некоторых топлив и близких к ним химических продуктов

На рис. 5 приводятся индексы несчастных случаев для бензина и некоторых других топлив. Можно полагать, что аммиак и гидразин более токсичны, чем бензин. Однако на риск работы с ними придется пойти в том случае, если нужда заставит применять их при нехватке бензина TF-1, представляющее собой смесь гидразина, воды и аммиака, будет характеризоваться индексом несчастных случаев, скорее всего, между индексами для гидразина и аммиака (примерно порядка 20 мм рт. ст./частей на млн). Это всего на один порядок выше, чем у бензола и других ароматических углеводородов, содержащихся в топливе. Синтетические углеводороды, полученные путем гидрогенизации угля, должны содержать больше ароматических углеводородов, чем бензин, полученный из нефти, и их индекс несчастных случаев может быть близок к индексу несчастных случаев для бензола.

Опасность при вдыхании необычных топлив не ограничивается только самим топливом, а должна включать оценку опасности и отработавших газов. Несмотря на усилия, предпринятые для удаления из отработавших газов двигателей внутреннего сгорания таких загрязнителей окружающей среды, как окись углерода, эта опасность остается и будет существовать еще многие годы. Огравление отработавшими газами двигателя является основной причиной смертельного исхода. В 1970 г. было зарегистрировано 1620, в том числе 803 смертельных отравлений отработавшими газами во время нахождения автомобилей на стоянках. Азотоводороды в отличие от бензина горят «чисто», образуя азот и воду (возможны следы NO_x). При их сжигании полностью исключается проблема отравления окисью углерода. Таким же преимуществом обладает, конечно, и водородное автомобильное топливо.

Другим значительным экологическим преимуществом паров гидразина является то, что они, улетучиваясь в воздух или проходя через воду, не отличаются большой стойкостью и поэтому не накапливаются. Они легко самоокисляются под влиянием солнечного света до азота и воды в воздухе или в воде. Обезжиривание растворов гидразина осуществляется в проточных реакторах над активированным углем.

Возможность случайного попадания в организм азотоводородных топлив значительно меньше, так как они издают легкообнаруживаемый предупреждающий запах, как, например, запах аммиака в TF-1.

С точки зрения возможности поражения кожи и глаз азотоводороды более опасны, чем бензин, но менее опасны, чем аккумуляторная кислота, с которой каждый автомеханик обычно имеет дело. Опасность при обращении с топливом TF-1 сравнима с опасностью обращения с используемым в домашнем хозяйстве раствором аммиака (10%-ный водный раствор).

Важным критерием оценки безопасности современных и будущих автомобильных топлив является их воспламеняемость и пожарная опасность. Пожарная опасность топлива оценивается на основании физических свойств, определяемых в лабораторных ус-

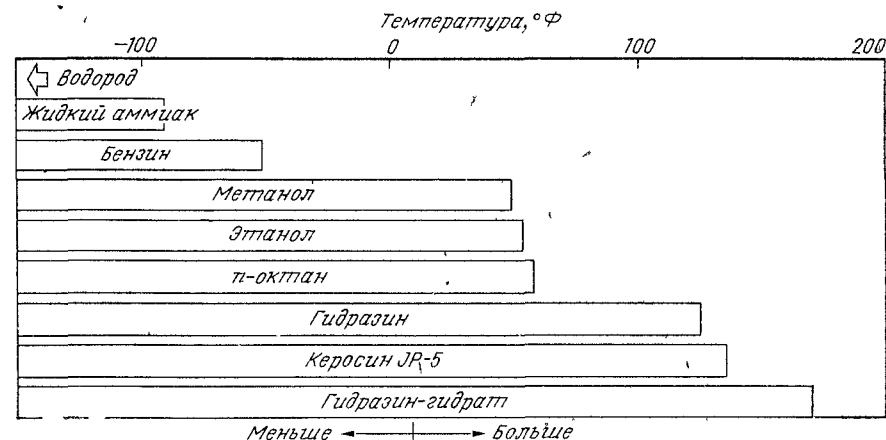


Рис. 6 Температура вспышки углеводородных и неуглеводородных топлив

ловиях различными методами, как, например, температура вспышки и границы воспламеняемости. Эти показатели имеют значение не только для определения пожарной опасности топлива, но и для конструирования двигателей внутреннего сгорания, рассчитанных на применение данного топлива. Температура вспышки бензина и необычных топлив приводится на рис. 6. Температура вспышки смеси азотоводородного топлива, например TF-1, будет определяться более летучим компонентом, которого содержится в нем около 10% по массе. Однако необходимо учитывать не только температуру вспышки, но и пределы воспламенения, а также энергию, требующуюся для воспламенения. Воспламенение аммиака (табл. 2) в смеси с воздухом происходит в пределах от 15 до 28% по объему. Аммиак не очень горюч, и его пламя при небольшом движении воздуха гаснет. Пламя аммиака распространяется только вверх, но не вниз. Кроме того, энергия, требующаяся для воспламенения стехиометрической смеси аммиака с воздухом, очень высока и равна 680 кДж (для *n*-гексана — 0,4 и *n*-гептана — 0,3 кДж). Одним из основных недостатков водородного автомобильного топлива является его чрезвычайная чувствительность к воспламенению от искры во время транспортирования и хранения. Для водорода энергия воспламенения составляет всего 0,02 кДж. С точки зрения пожарной опасности азотоводородные топлива менее опасны, чем другие топлива.

Разливы азотоводородного топлива легко обезвреживаются, а пожары легко гасятся с помощью воды, потому что топливо полностью смешивается с водой. Когда содержание гидразина в смеси с водой менее 40%, он вообще перестает гореть.

Азотоводородное топливо несовместимо с некоторыми металлами и материалами, используемыми в современных бензиновых двигателях. Можно ожидать, в частности, коррозию бронзо-

Таблица 2. Сравнение опасности воспламенения в воздухе [11]

Топливо	Граница воспламеняемости, % по объему		Состав стехиометрической смеси, % по объему	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения в лабораторных условиях, °С
	нижняя	верхняя			
Бензин	1,2	7,1	1,5	-45,6	470,0
Керосин IP-4	1,3	8	0,9	56,7*	240,0
Метанол	6,7	36	12,25	15,6	385,0
Этанол	3,3	19	6,53	13,9	365,0
Аммиак	15	28	21,83	≥ -62,2	850,0**
Гидразин	4,7	100	17,32	52,2	270,0***
TF-1					
Водород	4,0	75	29,53	~37,8	400,0

* IP-5.
 ** В стали 651,1°С
 *** В стали 157,2°С.

вых, медных, цинковых, магниевых и алюминиевых сплавов, находящихся в контакте с этим топливом. Из-за такой несовместимости пришлось несколько задержать проведение демонстрационных испытаний, так как потребовались значительные усилия для переоборудования или защиты от коррозии обычных насосов и карбюраторов. Однако азотоводородное топливо совместимо с нержавеющей сталью марок 300 и 400, а также с рядом полимеров, которые не могут использоваться в контакте с бензином.

Эксплуатация двигателя. Здесь рассматриваются вопросы эксплуатации двигателей в основном внутреннего сгорания, применяемых в настоящее время, хотя в перспективе для азотоводородного топлива могут быть созданы специальные установки, например электродвигатели с топливными элементами. Будут рассмотрены двигатели, в которых может использоваться азотоводородное топливо, способы подачи и воспламенения такого топлива, методы запуска двигателя, возможные степени сжатия, удельный расход топлива и потенциальные проблемы, связанные с содержанием загрязнений в отработавших газах. К сожалению, оценка качества азотоводородного топлива находится пока в начальной стадии и на сегодняшний день не на все вопросы можно ответить.

Перед началом проведения экспериментальной оценки азотоводородного топлива в Корпорации ракетных исследований НАСА (Льюис), согласно уравнениям химического равновесия, с помощью ЭВМ были вычислены теоретическая температура сгорания и давление для адиабатного и изохорного сгорания топливно-воздушных смесей. Как видно из рис. 7, максимальная температура пламени для всех топлив достигается при стехиометрической рабочей смеси. Теоретическая температура пламени топлива TF-1 ниже теоретической температуры других топлив. Однако температура сгорания не является единственной мерой энергосодержания. Более высокая теплоемкость и количественное

отношение теплоемкостей продуктов сгорания в потоке могут охарактеризовать работу в большей степени, чем при помощи лишь температуры пламени. То же самое явление наблюдалось при впрыске воды в двигатели внутреннего сгорания, работавшие на водороде. Высокая температура пламени нежелательна, потому что она увеличивает как износ двигателя, так и образование NO_x .

Аналогичным образом производился расчет пикового давления при постоянном объеме (рис. 8). Начальное давление выбиралось выше 0,1 МПа в зависимости от степени сжатия. Однако при выборе более высоких давлений происходит лишь смещение кривых при прежнем их относительном положении. Пиковое давление для TF-1 несколько ниже пикового давления n -октана или гидразина. Пользуясь этими данными, можно вычислить среднее эффективное давление и теоретическую термическую эффективность для двигателя, работающего по циклу Отто.

С аммиаком было проведено большое количество моторных испытаний, и поэтому могут быть сделаны некоторые выводы относительно топлива TF-1. TF-1 и другие гидразиновые смеси, как показали испытания, могут удовлетворять некоторым эксплуатационным требованиям только при добавлении аммиака. Одним из преимуществ аммиака, которое было обнаружено в ходе этих ранних испытаний, является то, что он может использоваться при очень высоких степенях сжатия (табл. 3). Однако аммиак трудно воспламеняется и для его воспламенения требовалось применять более сильные катушки или двойные свечи зажигания. Из-за того, что пламя аммиака распространяется очень медленно и «диаметр охлаждения» большой, очень трудно было достичь полного сгорания [1]. Пламя гидразина распространяется быстрее, и диаметр его охлаждения меньше, поэтому можно полагать,

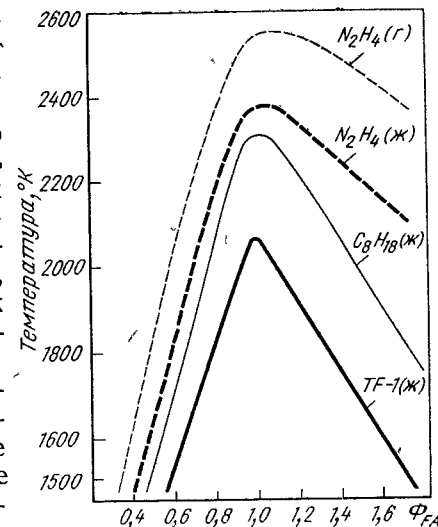


Рис. 7. Температура адиабатного сгорания в зависимости от эквивалентного содержания горючего (Φ) в рабочей смеси

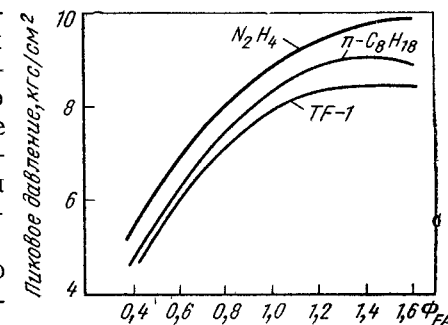


Рис. 8. Влияние Φ на пиковое давление при сгорании в условиях адиабатного постоянного объема

Таблица 3. Степень сжатия для аммиачного топлива

Автор	Исследованные пределы	Рекомендованные степени
Штаркман и сотр. [1]	8—10	—
Грей и сотр. [5]	8—16	—
Корнелиус и сотр. [2]	9,4—18	12 с наддувом
Грейвс и сотр. [12]	10,2	—
Сойер и сотр. [12]	10,2	—
Пирсолл и Гарабедян [13]	12—30	12—16

что он будет сгорать полнее. В процессе моторных испытаний в Корпорации ракетных исследований в отработавших газах топлива TF-1 удалось обнаружить только следы аммиака. Причиной их наличия может быть попадание аммиака во время перекачки топлива, когда они могли задержаться в выпускной системе двигателя вместе с другими продуктами конденсации.

До того как были проведены систематические испытания топлива по программе с использованием одноцилиндрового двигателя CFR, Корпорация ракетных исследований провела демонстрационные испытания азотоводородного топлива в одноцилиндровом четырехтактном двигателе внутреннего сгорания, приводившем в действие электрогенератор. Электрогенератор был выполнен балансирным для измерения крутящего момента, и при различной электрической нагрузке измерялся расход топлива. Двигатель был оборудован приборами для измерения впускного давления, давления в цилиндре, температуры в цилиндре и расхода топлива.

Гидразин впрыскивался непосредственно в горловину карбюратора после запуска двигателя на бензине. Переход от бензина к азотоводородному топливу происходил гладко и никаких проблем, связанных со смешиванием, не возникало. Были испытаны четыре двойные гидразиновые смеси, содержавшие 0, 10, 20, 30 и 40% воды, и тройная смесь — топливо TF-1. Удельный расход топлива двойных смесей, выраженный в кг/л.с., проходил через минимум при содержании от 20 до 30% воды (рис. 9). Минимальный удельный расход из всех азотоводородных топлив был достигнут на топливе TF-1, хотя по сравнению с бензином этот расход был вдвое больше (рис. 10).

Эти испытания были только предварительными. Планируется проведение дополнительных испытаний на многоцилиндровых двигателях.

Во время этих испытаний будут исследоваться отработавшие газы при различных отношениях воздуха к топливу и различных нагрузках.

Уникальным свойством гидразиновой азотоводородной смеси является его способность к самозапуску подобно одноком-

понентным ракетным топливам. Разложение гидразина на аммиак, водород и азот над некоторыми катализаторами происходит по формуле $N_2H_4 \rightarrow \frac{4}{3}(1-X)NH_3 + [(2X+1)/3]N_2 + 2XH_2 + (832,8 - X \cdot 457,3)$ ккал/кг, где X — доля диссоциированного аммиака

Для TF-1 X , вероятно, должна быть между 0,4 и 0,6. При этом образуется горячий газ высокого давления без необходимости подвода для горения воздуха или кислорода. Как видно из рис. 11, пусковой топливный бак содержал небольшое количество топлива TF-1 (около 60 г). Начальное количество может подаваться в газогенератор путем открытия пускового клапана нажатием на поршень, который иногда спаривают с педалью акселератора. Поскольку нежелательно хранить топливо под давлением, может быть использована дифференциальная система. В этом варианте из газогенератора отводится небольшая часть отработавшего газа, используемая для оказания давления на поршень с дифференциальной поверхностью. Поверхность поршня со стороны топлива меньше поверхности поршня со стороны горячего газа, что увеличивает давление подаваемого газа, компенсируя снижение давления в реакторе. Бак для пускового топлива во время работы двигателя сам наполняется и остается наполненным при выключенном двигателе. После запуска двигателя клапан пускового бака открыт, и по крайней мере на двух цилиндрах (на рис. 11 показан только один) трехходовой кран на пусковом клапане устанавливается в позицию S. Для преодоления мертвой точки поршня, вначале находящегося под давлением пускового газа, требуется предусмотреть некоторые меры. Запуск дизелей с твердыми газогенераторными патронами ракетного топлива осуществляется обычно в холодных климатических условиях с помощью того же принципа. В связи с тем, что нежелательно выпускать горячий отработавший газ из пусковых цилиндров, он может быть смешан с воздухом и направлен в остальные цилиндры, в которые всасывается воздух, и смесь воспламенится от искры. В этих цилиндрах

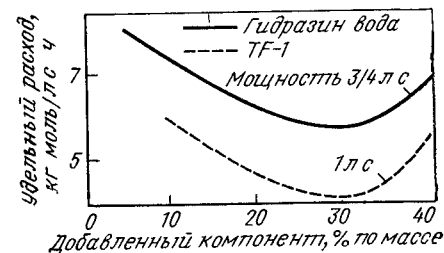


Рис 9 Зависимость удельного расхода топлива, представляющих гидразиновые смеси, от процентного содержания добавленного компонента

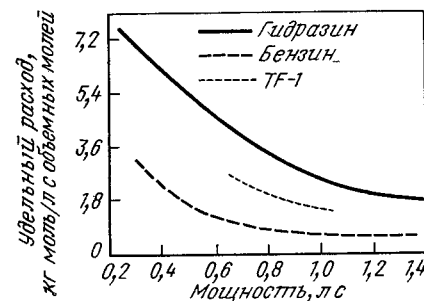


Рис 10 Зависимость удельного расхода топлива от электрической мощности

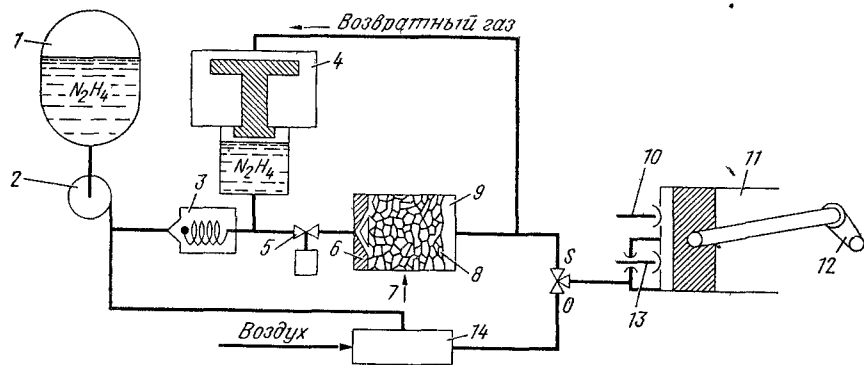


Рис 11 Схема самозапускающегося двигателя внутреннего сгорания, работающего на однокомпонентном топливе.

1 — основной топливный бак автомобиля, 2 — топливный насос, 3 — обратный клапан, 4 — топливный бак стартера, 5 — клапан стартера, 6 — форсунка, 7 — катализатор, 8 — удерживающая сетка, 9 — газогенератор, 10 — выпускной клапан, 11 — цилиндр двигателя, 12 — коленчатый вал, 13 — впускной клапан, 14 — карбюратор

горячий газ будет способствовать испарению топлива и в связи с повышенным содержанием водорода улучшать воспламеняемость смеси. После начала работы цилиндров, всасывающих воздух, трехходовой кран переключается в положение 0 для того, чтобы пусковые цилиндры могли сообщаться с другими цилиндрами, всасывающими воздух.

Потенциально возможное уменьшение массы в целом при исключении пускового двигателя показано в табл. 4, в которой приводятся доли массы некоторых типичных агрегатов двигателей 1975 г. Путем исключения пускового двигателя и уменьшения вдвое массы батареи и генератора за счет снижения требований к нагрузке (план А) можно будет уменьшить на 9% массу типичного четырехцилиндрового двигателя. Масса газогенератора и системы управления, используемые вместо пускового двигателя, составляет менее 900 г. Если батарею и генератор заменить топливным элементом гидразин-воздух (план В), то уменьшение массы будет еще больше, примерно 12% от массы двигателя L-4

Таблица 4 Масса агрегатов современных автомобилей

Основной двигатель	Масса, кг				Снижение массы, %	
	Двигатель с трансмиссией ¹	Аккумулятор	Стартер	Генератор переменного тока	План А	План В
Вера 140	159 л L-4	152,407	14,061	7,121	4,536	4,173
Бюик 231	318 л V-6	213,642	15,059	8,528	4,536	3,447
Олдсмобил 350	636 л V-8	298,010	13,154	8,800	4,627	2,449
						3,719

¹ В том числе все атрибуты в двигателе и трансмиссии после установки на автомобиль, как, например масло, охлаждающая жидкость, стартер и генератор переменного тока.

(в зависимости от массы топливного элемента). В вооруженных силах США разработаны легкие топливные элементы типа гидразин-воздух. Если двигатель не будет постоянно приводить в действие генератор, то независимо от того, будет ли он заряжать батарею или нет, пробег автомобиля увеличится. Однако часть выигрыша в массе может быть потеряна вследствие большей массы топлива, если вместо бензина будет использовано азотоводородное топливо

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ КОММЕНТАРИИ

Исследования и предварительные испытания показали, что азотоводородное топливо приемлемо в качестве автомобильного после истощения ресурсов ископаемых топлив. Для ответа на вопросы, касающиеся удельного расхода такого топлива и его термического к. п. д. в двигателях внутреннего сгорания, требуется проведение дополнительных испытаний. Перспектива использования азотоводородного топлива зависит от разработки достаточно экономического метода его синтеза из воздуха и воды с помощью электрической энергии, вырабатываемой другим источником. Перспектива использования азотоводородного топлива будет также зависеть и от его конкурентоспособности при сопоставлении с другими синтетическими топливами — заменителями бензина.

Предложена модель (рис 12), которая позволит предсказывать наиболее экономичные условия перехода от углеводородов к азотоводородам в зависимости от времени. В модель введены данные об увеличении цен на углеводородное топливо, получаемое из различных первичных источников энергии (в отдельности и в сочетании друг с другом), и прогнозы роста потребления. Важ-

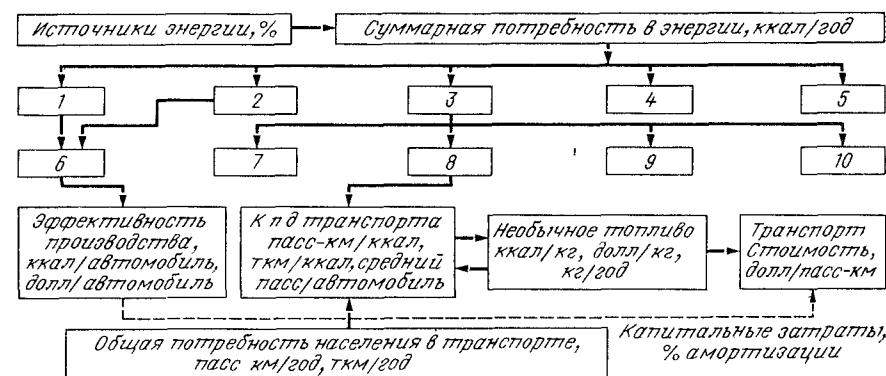


Рис 12 Упрощенная экономическая модель использования энергии транспортом

1 — химические процессы, 2 — промышленность, 3 — транспорт, 4 — коммунальный сектор, 5 — прочие, 6 — автомобильная промышленность, 7 — железнодорожный и водный транспорт, 8 — легковые автомобили, 9 — воздушный транспорт, 10 — автобусы и грузовые автомобили

ными параметрами модели будут также возможность использования различных источников энергии в сочетании друг с другом; стоимость энергии для производства синтетического топлива; выгоды, которые могут быть получены за счет использования отходящего тепла для установок двойного назначения. Окончательная оценка должна основываться на величине количества долларов, приходящихся на километр пробега. В значении этой величины должны также учитываться цена на автомобиль и срок его службы. Особое внимание обращается на легковые автомобили. Остальные виды транспорта также включаются. Применение единого топлива на всех машинах позволит упростить систему распределения по сравнению с современной системой с тремя видами бензина и несколькими видами дизельного и реактивного топлива, которые приходится отдельно транспортировать, хранить и перекачивать.

ОБСУЖДЕНИЕ

М. К. Хардин (Отдел «Детройт Эллисон дивижн» фирмы «Дженерал моторс»). В Вашей работе подчеркивается, что система с каталитическим монотопливом позволит исключить необходимость пусковой системы двигателя. Может ли топливо TF-1 каталитически активироваться? Имеет ли эта смесь достаточные характеристики ракетного топлива?

Шмидт Да. TF-1 является очень сильным ракетным монотопливом, несмотря на то, что к гидразину в этом топливе добавлены аммиак и вода. Температура пламени достаточно высока, чтобы обеспечить обильное парообразование. Я не помню точку росы продукта, но она равна по крайней мере 200—260°C, и, следовательно, для привода стартера пар будет иметь температуру 200—260°C.

С Грач (фирма «Форд мотор») У меня три вопроса. Во-первых, Вы говорили, что низкая температура пламени является свидетельством меньшего образования окислов азота. Я думаю, что это справедливо только для окислов азота, образующихся на воздухе. Имеются ли у Вас основания утверждать, что то же самое справедливо для чистого азота? Я не думаю, чтобы это было так. Во-вторых, Ваше сравнение токсичности, основанное на определении испаряемости, по моему мнению, справедливо только для оценки токсичности при вдыхании. Насколько я понимаю, токсичность гидразина проявляется и при адсорбции его кожей, и поэтому мне кажется не причем здесь испаряемость. В-третьих, Вы говорили о снижении массы установки за счет изъятия аккумулятора. Но известно, что масса расходуемого топлива при переходе на TF-1 возрастет по крайней мере вдвое и больше, чем сведет выигрыш к нулю.

Шмидт Правильно. Испаряемость характеризует токсичность продукта только при вдыхании. Но когда речь идет о воздействии этого продукта на кожу, я всегда привожу сравнение с аккумуля-

торной кислотой, с которой автомеханикам приходится иметь дело. Поэтому можно сказать, что гидразин так же опасен, как и аккумуляторная кислота.

Что же касается образования окиси азота, то у нас пока нет каких-либо данных относительно содержания загрязнений в отработавших газах. Мы только знаем, что температура пламени TF-1 ощутимо ниже, чем температура пламени других топлив, которые используются в настоящее время.

Неизвестный. То обстоятельство, что в топливе имеется большое количество азота, означает, что для образования окиси азота совершенно не требуется высокой температуры.

Шмидт Отвечая на Ваш третий вопрос, отмечу, что для запуска двигателя расходуется очень небольшое количество топлива. Нам для этой цели требовалось всего 60 г.

Грач. Но Вам требуется топливо для эксплуатации двигателя и Вы должны его возить с собой.

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЖИДКОГО СИНТЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА НА АВТОМОБИЛЬНЫЙ РЫНОК

Е. М. ДИКСОН, Е. Е. ХЬЮЗ

Стэнфордский исследовательский институт, штат Калифорния, США

Исследовано экологическое, социальное, экономическое и промышленное влияние производства синтетического топлива, полученного из угля и горючих сланцев. На основании анализа энергетических источников делается вывод, что наиболее реальным является комбинированное использование синтетического и нефтяного топлив. Поэтому в исследовании особое внимание обращается на ресурсы и долю синтетической нефти в технологической цепи.

В связи с тем, что в настоящее время синтетическая нефть некоинкурентоспособна даже при высоких ценах на природную нефть, ключевым вопросом исследования является анализ выгод, связанных с производством синтетического топлива.

Установлено, что основными факторами, оказывающими влияние на развитие производства жидкого синтетического топлива, предназначенного для использования на автомобилях или других транспортных средствах, являются восстановление участков после горных выработок, возможная нехватка воды в сухих районах запада страны, загрязнение окружающего воздуха заводами по производству синтетического топлива, чрезмерно высокие темпы урбанизации населения сельских районов, социально-экономическая нестабильность, противоречия между местными традициями и промышленными интересами, потеря местной автономии, уменьшение экономического риска для производителей топлива.

Введение В настоящее время продемонстрированы технические возможности производства синтетического автомобильного топлива и дана оценка деятельности многих компаний и исследователей в этой области. Однако изучение влияния социальных и экологических факторов на технологию производства синтетического топлива находится лишь в самой начальной стадии. В сокращенном виде приводятся некоторые результаты нашей оценки.

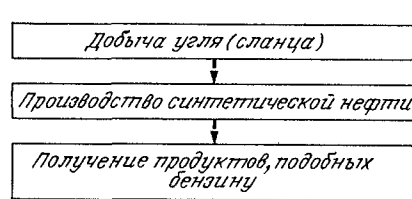


Рис 1 Схема производства жидкого топлива

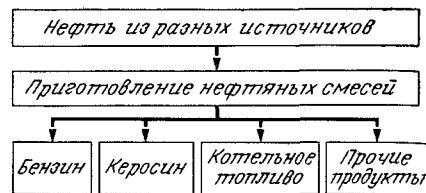


Рис 2 Схема производства нефтепродуктов из природной нефти

технологии производства синтетического топлива из угля и горючих сланцев. Исследование [1], финансировавшееся Управлением по охране окружающей среды, выполнялось объединенной группой в составе физиков, инженеров, экономистов, специалистов по экологии, социолога и юриста

Исследование касалось только синтетических бензинов, дистиллятных топлив и метанола, получаемых из угля, и синтетических бензинов и дистиллятных топлив, получаемых из горючих сланцев. Кроме того, с целью возможно лучшего использования уже произведенных крупных капиталовложений, больше внимания обращалось не на синтетические конечные продукты, а на синтетические нефти.

На рис. 1 и 2 представлены в упрощенном виде схемы производства топлива из синтетической нефти и соответственно производства топлива из природной. Особое внимание обращено на производство синтетической нефти, которую можно было бы смешивать с природной. Смешение должно производиться таким образом, чтобы потребителю было безразлично, какое сырье использовано для производства данного продукта — природная или синтетическая нефть. Таким образом, основные исследованные вопросы связаны с ресурсами сырья и производством из него топлива.

К сожалению, не все вопросы, раскрывающие возможность производства жидкого синтетического топлива, могли быть включены в настоящий доклад. Наиболее значительными из них являются результаты широкого исследования влияния воздуха на качество топлива.

Наиболее вероятные масштабы производства. В последние годы было много высказываний относительно будущих масштабов производства синтетического топлива из угля и горючих сланцев. Для определения влияния, которое может быть оказано производством этого топлива, был принят вариант с максимальными темпами развития промышленности производства жидкого синтетического топлива. Этот вариант и его влияние являются основным предметом настоящего доклада. Необходимо, конечно, иметь в виду, что он является не прогнозом, а лишь попыткой выяснить ситуацию при максимально возможном влиянии производства синтетического топлива.

Таблица 1 Предполагаемые показатели объема промышленного производства синтетического жидкого топлива

Топливо	1980 г	1985 г	1990 г.	1995 г	2000 г.
Производство синтетической нефти на установках мощностью, м ³ /сут					
4 770	0	3	7	7	0
15 900	0	0	3	13	40
Суммарное производство, тыс м ³ /сут	0	14,3	79,5	238,5	636,0
Производство синтетической нефти из сланцевой смолы на установках мощностью, м ³ /сут					
7 950	2	2	2	0	0
15 900	0	4	14	20	20
Суммарное производство, тыс м ³ /сут	15,9	79,5	238,5	318,0	318,0
Производство метанола из угля на установках мощностью, м ³ /сут					
7 950	2	2	2	0	0
15 900	0	5	19	50	80
Суммарное производство ¹ , тыс м ³ /сут нефтяного эквивалента	8,0	47,7	159,0	397,5	636,0

¹ Энергосодержание кубического метра метанола приблизительно равно половине энергосодержания кубического метра нефти

Вариант составлен на основании гипотетических коэффициентов развития промышленности производства синтетических топлив, представленных в табл. 1. Приведенные масштабы предусматривают незначительное их производство до 1985 г., а затем быстрое увеличение темпов до 2000 г. Относительно медленные темпы производства в начальный период объясняются современной ситуацией в нефтяной промышленности: а) рост активности поиска и производства энергии из обычных нефтяных источников и б) постоянное увеличение оценки стоимости заводов по производству синтетического топлива. В результате сосредоточения усилий на нефтяной промышленности может быть отложено сооружение заводов по производству жидкого синтетического топлива.

После 1980 г. предусматривается ускоренный рост производства синтетического топлива из горючих сланцев, а после 1985 г. — из угля. Такое развитие, безусловно, предполагает, что первые заводы будут оправдывать себя как в техническом, так и в экономическом плане. Это допущение сделано только для облегчения построения варианта, отражающего максимальные темпы, с которыми может развиваться промышленность, учитывая только физические и общеэкономические ограничения. Есть, конечно, и другие факторы, например ресурсы воды, которые могут обусловить снижение темпов развития производства синтетического топлива.

Вариант максимального развития производства синтетического топлива отражает несколько оценок, касающихся состояния трех

основных технологических процессов [2, 3]. Технология производства синтетического топлива из горючих сланцев наиболее близка к промышленному внедрению. Проведены испытания довольно больших масштабов, подтверждающие возможность использования разработанной технологии на крупных заводах. В области производства синтетического топлива в будущем (за исключением, возможно, технологии подземной газификации) не ожидается прогресса в такой мере, что заводы, сооружение которых начнется в настоящее время, окажутся устаревшими. Исходя из этих положений, согласно нашим расчетам по максимальному варианту, к 1980 г. должны быть сооружены два завода по производству синтетического топлива из сланцевой смолы мощностью по 7950 м³/сут и один завод мощностью 15 900 м³/сут к 1985 г..

После 1990 г. из-за недостатка воды производство синтетической нефти сланцевого происхождения должно будет оставаться на одном уровне.

Развитие промышленного производства метанола и синтетической нефти из угля зависит от успехов дальнейших исследований, разработок и демонстрации методов переработки угля. Ограничения в этой области связаны с неопределенностью рынка сбыта метанола в качестве топлива. Положение с состоянием технологии производства метанола из угля такое же, как и положение с производством синтетической нефти из горючих сланцев. В первом и во втором случаях подготовлены лишь начальные варианты промышленного производства. Большой прогресс в области производства метанола по сравнению с производством синтетической нефти из угля объясняется близостью процессов производства метана и метанола из угля и большим вниманием в последнее десятилетие к технологии производства синтетического природного газа по сравнению с технологией «сжижения» угля.

Для фактической реализации программ, представленных в табл. 1, по производству как синтетической нефти из горючих сланцев, так и метанола из угля требуется скорое выяснение существующих в настоящее время неопределенностей для того, чтобы стимулировать производство синтетического топлива. Некоторые факты последнего времени ставят под сомнение возможность достижения максимального уровня производства синтетической нефти из горючих сланцев к 1985 г., а именно: а) заявление фирмы «Колони дивелопмент оперейшн» о том, что она не будет сооружать запланированный на весну 1975 г. завод по переработке сланцевой смолы мощностью 7950 м³/сут в Парашют Крик (штат Колорадо); б) отсутствие энтузиазма в отношении горючих сланцев в опубликованном Федеральным энергетическим управлением «Проекте независимости»; в) технические масштабы использования метанола в качестве топлива, которые скоро должны достичь уровня производства 47 700 м³/сут (в нефтяных эквивалентах), намеченного на 1985 г. Наиболее вероятными потребителями метанола до 1985 г. будут электростанции (осо-

Таблица 2 Производство синтетической нефти из угля по максимальному варианту (по годам)

Данные и предположения	Значение показателя для крупного завода	1980	1985	1990	1995	2000
Программа производства						
Суммарная мощность, тыс. м ³ /сут	—	0	14,3	79,5	238,5	636
Число заводов:						
небольших (4770 м ³ /сут)	—	0	3	7	7	0
крупных (15 900 м ³ /сут)	—	0	0	3	13	40
Затраты и объем производства						
Строительство:		Суммарное количество				
капитальные вложения, млрд. долл.	0,67	0	0,60	3,4	10	27
рабочая сила, тыс. чел - лет	7,3	0	6,6	37	110	290
сталь, тыс. т	110	0	100	560	1700	4400
земельные площади, 4050 тыс. м ²	1	0	0,9	5,1	15	40
Производство:		Количество в год				
эксплуатационные расходы, млн. долл.						
1973 г./год	130	0	140	780	2300	6200
рабочая сила, тыс. чел.	1,4	0	1,3	7,0	21	56
уголь, млн т/год	18	0	16	90	270	720
вода, 1 235 250 м ³ /год	29	0	26	145	435	1160
Электроснабжение, МВт	140	0	130	700	2100	5600

бенно в качестве топлива для турбин или для генераторов с комбинированным циклом) и автомобильные парковые хозяйства.

Коэффициенты и варианты производства. Для составления вариантов производства синтетической нефти и метанола из угля и синтетической нефти из горючих сланцев, приведенных соответственно в табл. 2, 3 и 4, были использованы данные табл. 1. Для расчета капитальных затрат, трудозатрат, расхода стали и площадей, требующихся для строительной и эксплуатационной, фаз каждого из сооружаемых блоков, были установлены соответствующие коэффициенты изменения производства. В табл. 5 приводится аналогичная информация для угольных месторождений, разрабатываемых открытым способом, уголь которых идет для производства синтетической нефти и метанола.

Финансирование промышленности. Как видно из табл. 2, 3 и 4, заводы по производству жидкого синтетического топлива стоят дорого. С целью определения возможностей нефтяной промышленности финансировать налаживание производства синтетического топлива за счет собственных фондов был проведен расчетный анализ двух возможных вариантов, когда завод будет производить только нефтяное топливо или только нефтяное синте-

Таблица 3 Производство метанола из угля по максимальному варианту (по годам)

Данные и предположения	Значение показателя для крупного завода	1980	1985	1990	1995	2000
Программа производства						
Суммарная мощность, тыс м ³ /сут нефтяных эквивалентов ¹	—	7,95	47,70	158,99	397,48	636,90
Число заводов						
небольших (7950 м ³ /сут)	—	2	2	2*	0	0
крупных (15 900 м ³ /сут)	—	0	5	19	50	80
Затраты и объем производства						
Строительство						
Суммарное количество						
капитальные вложения, млрд. долл 1973 г	0,59	0,59	3,5	11,8	29,5	47,2
рабочая сила, тыс чел - лет	7,5	7,5	4,5	150	37,5	375
сталь, тыс т	100	100	600	2000	5000	8000
земельные площади, 4050 тыс м ²	1	1	6	20	50	80
Производство:						
Количество в год						
эксплуатационные расходы, млн долл. 1973 г /год	70	70	420	1400	3500	5600
рабочая сила, тыс чел	0,9	0,9	6,4	18	45	72
уголь (западный), млн т/год	13	13	78	260	650	1040
вода, 1 235 250 м ³ /год	15	15	90	300	750	1200
Электроэнергия, МВт	100	100	600	2000	5000	5000

¹ Энергосодержание кубического метра метанола равно половине энергосодержания кубического метра нефти

* Эти заводы будут расширены и перейдут в разряд крупных

тическое топливо. Количество нефтяного топлива взято из прогнозов развития нефтяной и газовой промышленности страны, содержащихся в проекте энергетической политики Фонда Форда [4], а количество синтетического топлива — из вышеупомянутого максимального варианта. При этом были сделаны некоторые допущения:

традиционные доходы после уплаты налогов будут иметь место и в будущем от производства как нефтяного, так и синтетического топлива. Подразумевается, что с помощью правительственного регулирования или по условиям рынка производство синтетического топлива будет прибыльным;

амортизационные отчисления будут примерно такими же, как в последние годы величина процентов с активов;

сохранится прежнее значение величины отношения задолженности к собственному капиталу;

сохранятся выплаты прибылей в прежних размерах

Таблица 4 Производство синтетической нефти из горючих сланцев по максимальному варианту (по годам)

Данные и предположения	Значение показателя для крупного завода	1980	1985	1990	1995	2000
Программа производства						
Суммарная мощность, тыс м ³ /сут нефтяных эквивалентов	—	15,9	79,5	238,5	318,0	318,0
Число заводов						
небольших (7950 м ³ /сут)	—	2	2	2*	0	0
крупных (15 900 м ³ /сут)	—	0	4	14	20	20
Зарплата и объем производства						
Строительство						
Суммарное количество						
капитальные вложения, млрд долл 1973 г	0,75	0,75	3,8	11,3	15,0	15,0
рабочая сила, тыс чел - лет	5,4	5,4	27	81	108	108
сталь, тыс т	90	90	450	1350	1800	1800
земельные площади, 4050 тыс м ²	0,6	0,6	3,0	9,0	12	12
Производство						
Количество в год						
эксплуатационные расходы, млн долл 1973 г /год	80	80	400	1200	1600	1600
рабочая сила, тыс чел	1,7	1,7	8,5	25,5	34,0	34,0
горючие сланцы, млн т/год	54	54	270	810	1080	1080
вода, 1 235 250 м ³ /год	16	16	80	240	320	320
Электроэнергия, МВт	170	170	850	2250	3400	3400
Земельные площади, 4050 тыс м ² /год	0,15	0,15	0,75	2,25	3,0	3,0

* Эти заводы будут расширены и перейдут в разряд крупных

Расчеты согласуются с алгоритмом Хааса и сотрудников [5]. Они скорректированы по темпам инфляции 0,5 и 8% в год. Базовым годом для курса доллара принят 1973 г. На рис 3, а, б приводятся расчеты с темпом инфляции 8%.

В отсутствие инфляции промышленность будет способна самостоятельно финансировать расходы, связанные с производством синтетических топлив, а при 5 и 8% инфляции, в год потребуются значительные субсидии извне. Основной причиной такой разницы является неспособность амортизационных кредитов полностью возместить потребность в капиталовложениях на восстановление устаревшего оборудования в условиях инфляции. Это является следствием того, что амортизационные кредиты рассчитываются по начальной стоимости в номинальных долларах, в то время как они обладают только текущей покупательной силой.

Истощение ресурсов. Обычно предпринимательство, связанное с производством синтетического топлива, подвергается эко-

Таблица 5 Потребность в открытых угольных разработках для производства синтетической нефти и метанола (по годам)

Данные и предположения	Значение показателя для шахт производительностью 5 млн т/год	1980	1985	1990	1995	2000
Программа производства						
Суммарная мощность, млн т/год	—	13	94	350	920	1760
Число шахт с добычей 5 млн т/год	—	3	19	70	184	352
Затраты и объем производства						
Строительство		Суммарное количество				
капитальные вложения, млрд долл 1973 г	0,03	0,09	0,57	2,1	5,5	10,6
рабочая сила, тыс чел - лет	0,25	0,75	4,75	17,5	46,0	88,0
сталь, тыс т	3	9	57	210	552	1060
земельные площади ¹ , 4050 тыс м ²	10	30	190	700	1840	3520
Производство		Количество в год				
эксплуатационные расходы, млн долл 1973 г /год	12	36	228	840	2210	4220
рабочая сила, тыс чел	0,1	0,3	1,9	7	18	35
вода, 1235 250 м ³ /год	0,15	0,45	2,85	10,5	27,6	52,8
Электроэнергия, МВт	10	30	190	700	1840	352
Земельные площади ¹ , 4050 тыс. м ² /год	0,25	0,75	4,75	17,5	46	88

¹ Площади под строения, склады, погрузочно-разгрузочное оборудование и т. п. Эти площади не относятся к площадям карьеров.

номическому анализу с целью определения, насколько оно оправдано. Недавно для анализа количества производимой энергии по сравнению с технологической энергией, затрачиваемой на ее получение, был введен термин «чистая энергия». На рис. 4 показана схема такого анализа. При этом $\mathcal{E}_{\text{источ}}$ означает количество энергии, содержащееся в первичном его источнике, $\mathcal{E}_{\text{топл}}$ — энергосодержание топлива, использованного для добычи первичного источника энергии, $\mathcal{E}_{\text{мат}}$ — количество энергии материалов, использованных в процессе сооружения завода, на котором при переработке сырья производится топливо, и $\mathcal{E}_{\text{прод}}$ — энергосодержание полученного продукта — топлива. Таким образом, делается попытка учесть все косвенные и прямые энергетические затраты.

Метод чистого энергетического анализа особенно полезен при сравнении альтернативного использования одних и тех же источников энергии, но менее полезен при производстве одинаковых топлив из различных первичных источников энергии. На рис. 5,

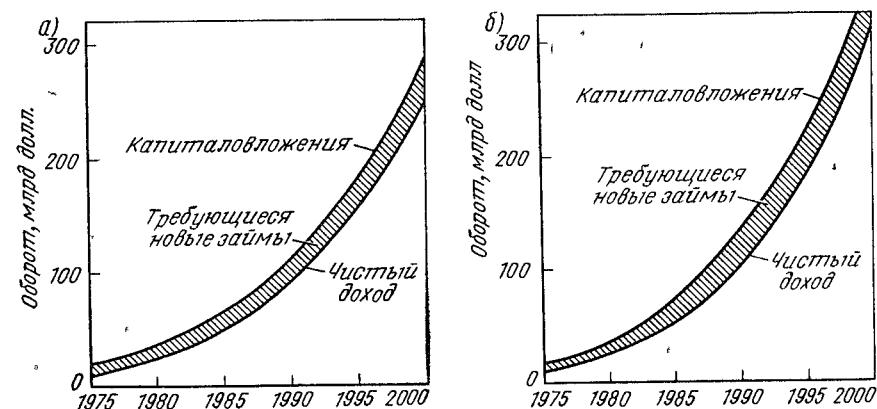


Рис. 3 Предполагаемое движение денежной наличности в нефтяной и газовой промышленности страны:

а — без производства синтетического жидкого топлива, б — при обычных темпах ее развития плюс производство синтетического топлива

6 и 7 показаны расчеты, выполненные доктором Р. Стилом для цепи: первичный источник энергии — топливо. На этих рисунках в прямоугольниках обозначен характер выполняемых работ, в кружочках — энергосодержание топлива, в овалах — непосредственные энергетические затраты и в косых прямоугольниках — сумма непосредственных и косвенных энергетических затрат. Из рисунков видно, например, что при «сжижении» угля затраты энергии на приобретенные химические реагенты и катализаторы сравнимы с прямыми затратами энергии на купленную электроэнергию (правда, затраты на уголь значительно превосходят и те, и другие). На рис. 5 представлен один из многих модулей, показанных на рис. 7.

Полученные нами энергетические зависимости показаны в табл. 6, из которой видно, что вариант с синтетической нефтью представляется менее целесообразным, чем производство метанола из угля. Интересно сравнить эти показатели с аналогичными расчетами для жидких синтетических продуктов, полученных методом подземной газификации угля. Чистый энергетический анализ полезен для формирования общественной политики по отношению к синтетическому топливу, но он только косвенно характеризует истощение ресурсов первичной энергии.

Наиболее крупные запасы горючих сланцев промышленного значения (с содержанием сланцевой смолы от 95 до 114 л на тонну породы) размещены в Писинском бассейне Западного Колорадо. Уголь, в отличие

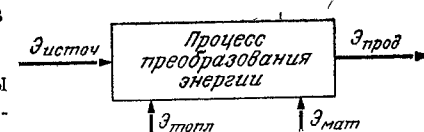


Рис. 4 Структурная схема «чистого» энергетического коэффициента «Чистый» энергетический коэффициент =
$$\frac{\mathcal{E}_{\text{прод}}}{(\mathcal{E}_{\text{источ}} - \mathcal{E}_{\text{прод}}) + \mathcal{E}_{\text{топл}} + \mathcal{E}_{\text{мат}}}$$

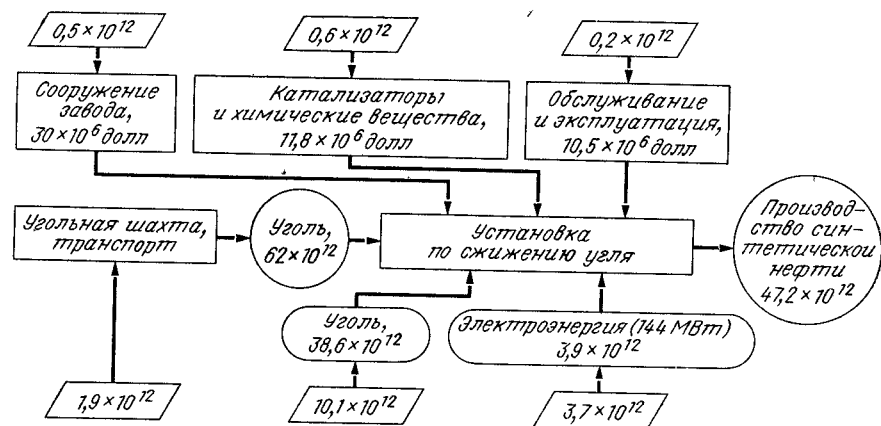


Рис 5 Годовые затраты на сооружение и эксплуатацию установки гидрогенизации угля (H-Coal) для производства синтетического жидкого топлива производительностью 15900 м³/сут. Все энергетические затраты и выходы энергии даются в килокалориях, стоимость приводится в долларах 1973 г.

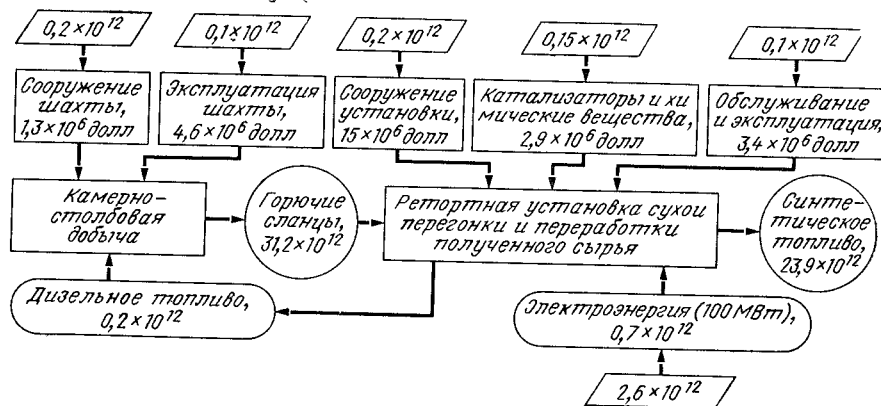


Рис 6 Годовые, энергетические затраты на сооружение и эксплуатацию комплекса по добыче горючих сланцев, их сухой перегонке и переработке полученного сырья на установке мощностью 7950 м³/сут. Все энергетические затраты и выходы энергии даются в килокалориях, стоимость приводится в долларах 1973 г.

от горючих сланцев широко распространен по всей территории США. В табл. 7 приводятся опубликованные сведения о запасах угля в США, который может добываться открытым способом, и о количестве заводов по «сжижению» угля, которые могут обеспечиваться этим углем. Поскольку для обеспечения топливом производство жидкого синтетического топлива требует дешевого сырья, в исследовании упор делается на использование угля, который можно добывать открытым способом. Очевидно, что запасы угля, добываемого открытым способом, обеспечат

сырьем по максимальному варианту заводы в течение нескольких сроков их службы. Однако, если учесть и другие потребности в угле, то запасов угля, добываемого открытым способом, может хватить лишь до начала XXI столетия¹.

Это вызывает потребность в развитии технологии подземной переработки угля и усовершенствовании подземных способов его добычи (особенно в связи с тем, что современные методы не могут эффективно использоваться для добычи мощных пластов глубокозалегающего угля в западных штатах страны).

Влияние социальных и экономических факторов. Совершенно очевидно, что производство жидкого синтетического топлива связано главным образом с добычей и переработкой первичных источников энергии, поэтому в первую очередь их влияние скажется в регионах, в которых эти источники будут добываться и перерабатываться.

Экономически важные районы, в которых предполагается наиболее интенсивная добыча угля, следующие: в штате Колорадо — Рио-Бланко, Гарфилд, Денвер, Меса; в штате Северная Дакота — Майпот, Мак-Лин, Дани, Оливер, Бисмарк, Мерсер; в штате Вайоминг — Кэмпбел, Каспер; в штате Иллинойс — Вашингтон.

Таблица 6 «Чистые» энергетические коэффициенты

Сырье и способ получения	Синтетическая нефть	Продукт
Горючие сланцы	2,3	1,7
Уголь из штата Иллинойс	1,8	1,1
Уголь из штата Вайоминг	1,5	1,1
Метанол	—	0,59
Уголь из района Четырехугольника		

¹ Важно отметить разницу между запасами и ресурсами. Запасы представляют собой ту часть ресурсов, которую можно добыть с помощью технологии, разработанной на данный период времени при экономически оправданных затратах. Поэтому при изменении на рынке цен на сырье или усовершенствовании технологии добычи оценка запасов изменится, а ресурсы могут измениться только при обнаружении новых месторождений.

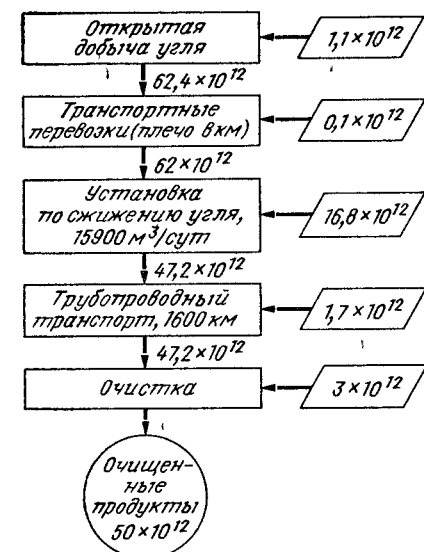


Рис 7 Годовые энергетические затраты для производства топлив из западного угля, добываемого открытым способом на Среднем Западе. Все энергетические затраты и выходы энергии даются в килокалориях.

Сан-Луис, Сан-Клэр, Перри, Джефферсон; Франклин, Вильямсон; в штате Кентукки—Ашленд, Джонсон, Магоффин, Флойд, Пайк, Мартин, Хантингтон. Уголь здесь добывается открытым способом. Эти работы будут связаны с большим расходом воды и большим притоком людей. В табл. 8 приводится график производства топлива для максимального варианта в штатах (см. табл. 7), имеющих подходящие угольные месторождения. С целью упрощения весь график округов добычи горючих сланцев отнесен к штату Колорадо. В этих округах размещены наиболее подходящие для разработки месторождения горючих сланцев.

С добычей источников энергии и производством топлива прямо или косвенно будут связаны большие контингенты людей: на разработку месторождений и сооружение заводов будут привлекаться шахтеры, администраторы, операторы; на вспомогательные предприятия обслуживания будут привлекаться рабочие. Численность населения (с учетом приезда семей) для названных отраслей промышленности, по нашим оценкам, возрастет в 6,5 раза.

При определении потребности в рабочей силе для каждого типа завода в зависимости от его масштаба необходимо расчет вести отдельно для каждого этапа сооружения и эксплуатации в зависимости от профессиональной принадлежности рабочих и служащих. На рис. 8 приводятся потребности в рабочей силе (непосредственные и косвенные) в зависимости от типа и размера завода по производству жидкого синтетического топлива. Эти зависимости полезны для прогнозирования роста населения в районах, в которых начнется добыча и переработка угля и горючих сланцев в жидкое синтетическое топливо.

На рис. 9 представлен рост населения, который должен произойти при максимальном варианте в округе Кэмпбелл штата Вайоминг—округе, в котором находятся наиболее известные запасы угля в бассейне Паудер-Ривер. Население округа будет увеличиваться на 9% ежегодно только за счет промышленности по производству жидкого синтетического топлива. Если учесть пот-

Таблица 7 Штаты и районы, располагающие запасами угля, который может добываться открытым способом в количествах, достаточных для обеспечения промышленности производства жидкого синтетического топлива в больших масштабах

Штат	Запас угля, млрд т	Количество установок мощностью по 15 900 м ³ /сут, которые могут быть сооружены в течение 20 лет для переработки 20 млн т в год
Монтана	43	110
Вайоминг	24	60
Северная Дакота	16	40
Иллинойс/Западный Кентукки	16	40
Западная Виргиния/Восточный Кентукки	8,7	22

Таблица 8. Вероятное местонахождение заводов по производству синтетического жидкого топлива (по годам)

Штат, категория объекта	Суммарное количество				
	1980	1985	1990	1995	2000
<i>Вайоминг</i>					
Производство синтетической нефти из угля	0	2S	3S, 2L	3S, 5L	13L
Метанол	0	0	2L	8L	13L
Открытые разработки	0	2	14	42	81
Вода	0	18,525	127,205	330,98	642,20
<i>Северная Дакота</i>					
Метанол	S	S, 2L	S, 5L	13L	21L
Открытые разработки	2	9	20	47	76
Вода	9,88	46,93	102,51	240,83	389,00
<i>Иллинойс</i>					
Производство синтетической нефти из угля	0	S	S, L	S, 3L	7L
Метанол	0	1	4L	9L	14L
Открытые разработки	0	1	3	8	14
Подземные шахты	0	9	40	93	161
Вода	0	28,40	114,86	269,23	475,48
<i>Кентукки</i>					
Производство синтетической нефти из угля	0	0	S	S, 1L	4L
Метанол	S	S, L	S, 3L	7L	10L
Открытые разработки	1	1	3	7	13
Подземные шахты	0	10	23	52	87
Вода	9,88	28,41	74,1	170,43	308,75

Категории объектов, приводимых в таблице.

Заводы по производству синтетической нефти из угля S = 4 770 м³/сут
L = 15 900 м³/сут

Заводы по производству метанола S = 7 950 м³/сут
L = 15 900 м³/сут

Открытые разработки, добыча 5 млн т/год

Подземные шахты, добыча 1 млн т/год

Вода, расход 1 235 тыс м³/год

ребность в угле и других сферах применения, то рост населения будет значительно выше. Следует отметить, что за счет потребности в рабочей силе лишь для разработок месторождений горючих ископаемых население будет увеличиваться незначительно. Основная доля прироста населения произойдет за счет потребности рабочей силы для заводов по производству жидкого синтетического топлива.

На рис. 10 показаны темпы роста населения для округов Гарфилд и Рио-Бланко в штате Колорадо за счет добычи и переработки горючих сланцев по максимальному варианту. Темпы роста населения в этих округах составят 17% в год. Однако в отличие от округа Кэмпбелл, где можно ожидать и другого использования угля, в этих округах нельзя ожидать другого применения горючих сланцев, и поэтому, возможно, эти прогнозы окажутся

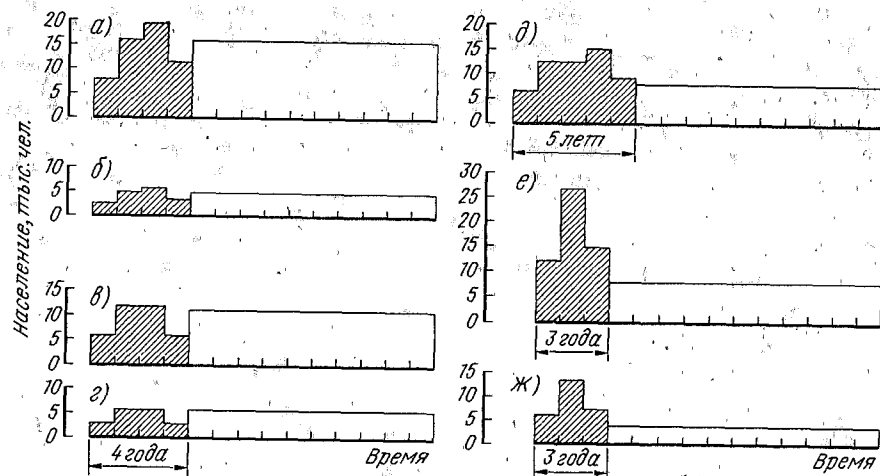


Рис. 8. Численность населения, связанная со строительством (на рисунке заштриховано) и эксплуатацией предприятий:

а — по «сжижению» угля, мощностью 15900 м³/сут; б — то же, мощностью 4770 м³/сут; в — по переработке горячих сланцев, мощностью 4770 м³/сут; г — то же, мощностью 7950 м³/сут; д — по производству метанола при растянутом периоде строительства, мощностью 7950 м³/сут; е — то же, при нормальном периоде строительства; ж — по производству метанола, мощностью 3975 м³/сут

наиболее удачными для оценки влияния максимального варианта на ситуацию в целом.

В верхней левой части рис. 14 и 15 приводятся масштабы производства топлива и потребность в воде. Для того чтобы можно было судить об относительной роли рассматриваемого района, производство топлива можно сравнить с производством топлива при максимальном варианте. Очень важное значение имеет потребность в воде. Этот вопрос будет рассмотрен ниже. Потребность в таком большом количестве воды явится, по всей вероятности, причиной больших дебатов.

В историческом плане высокие темпы роста промышленности часто имели место в различных районах США. На основании накопленного опыта планировки обычно считают верхним пределом прироста при обеспечении нормальных условий жизни общества примерно 5% в год. Более высокие темпы роста, как правило, вызывают различные местные финансовые и социальные затруднения.

Высокие темпы роста вызывают финансовые проблемы для местных властей по той причине, что из-за задержки налоговых поступлений не будет обеспечиваться удовлетворение коммунальных потребностей, как-то: строительство дорог, канализационных систем, школ, организация полицейской и пожарной защиты. Проблема эта возникает в связи с тем, что объекты, сооружаемые прибывающим населением, не дают налоговых выплат в полной мере до тех пор, пока они не будут полностью завершены

и не начнут действовать. В условиях продолжительного строительства задержка уплаты налогов может стать хронической проблемой, которая приведет к снижению жизненного уровня проживающего в данном районе населения и созданию дополнительных социальных проблем. Рок-Спрингс в штате Вайоминг, где недавно в связи с бумом в развитии горнодобывающей промышленности были начаты разработки дополнительных месторождений и сооружена электростанция, является примером места, где возникли крупные социальные проблемы. В связи с ними в Рок-Спрингсе чрезвычайно возросли по сравнению с другими

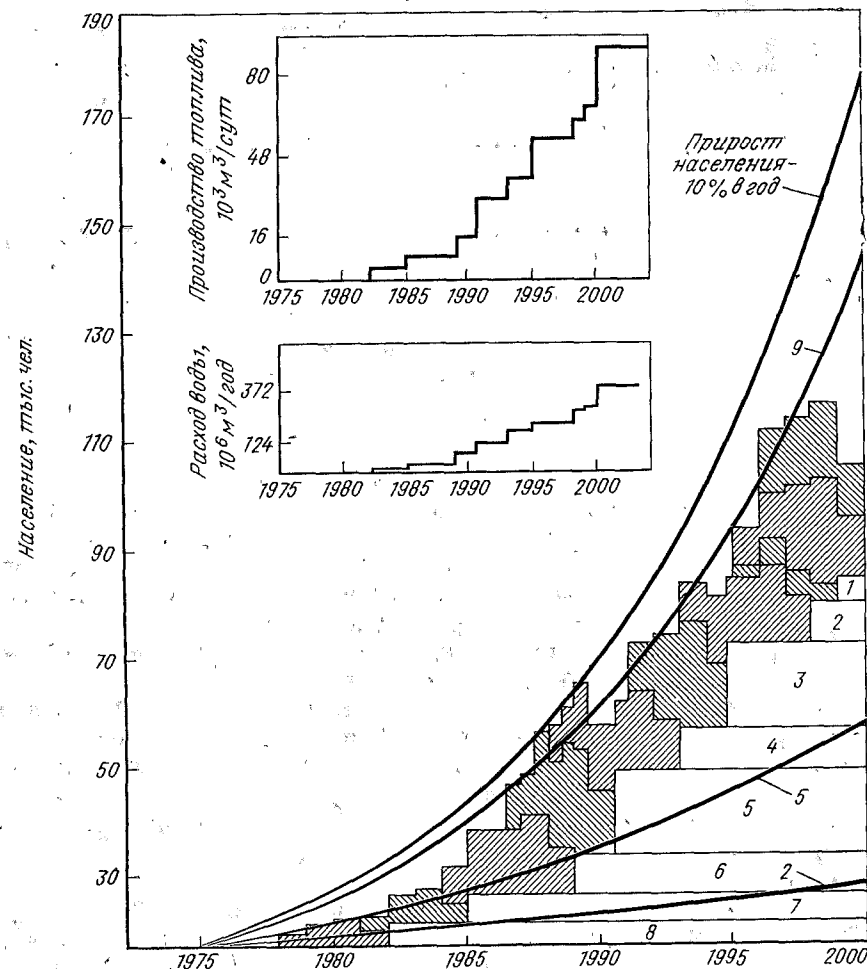


Рис. 9. Численность населения (округ Кэмпбелл, штат Вайоминг), связанная со строительством (на рисунке заштриховано) и эксплуатацией предприятий по производству:

1, 7, 8 — синтетической нефти, 4770 м³/сут; 2 — метанола, 7950 м³/сут; 3, 5 — синтетической нефти, 15900 м³/сут; 4, 6 — метанола, 7950 м³/сут нефтяных эквивалентов

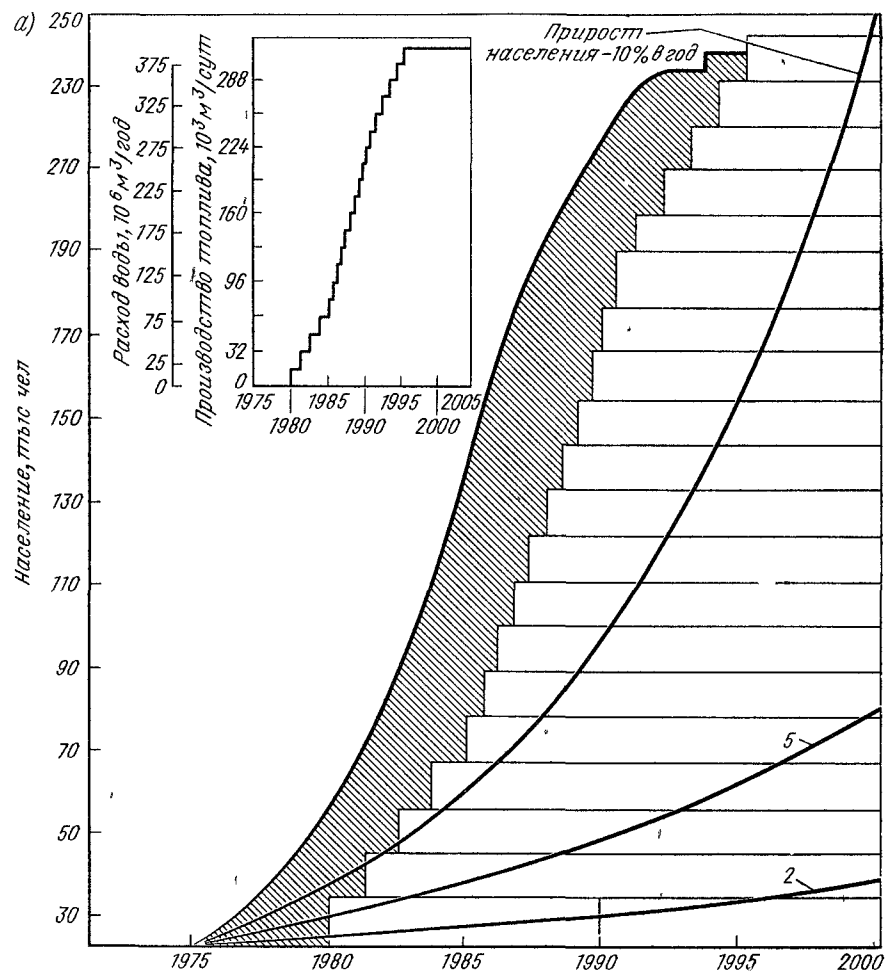
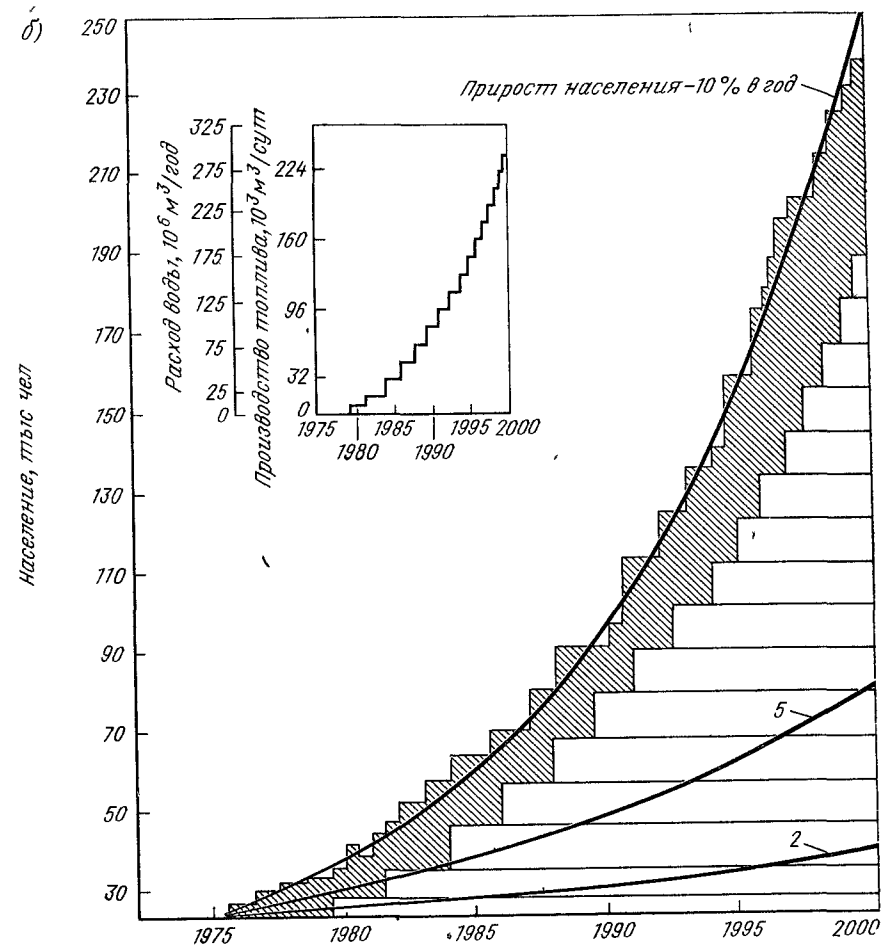


Рис 10 Численность населения, связанная со строительством (на рисунке за лива (каждый прямоугольник в правой части диаграммы соответствует про a — предприятия округов Рио Блаико, штат Колорадо Расчет произведен по максималы из условия годового

районами такого же масштаба преступность, разводы, самоубийства, алкоголизм и психические заболевания. Более того, возникли сильный дефицит жилья, санитарные проблемы и трудности в обеспечении здоровья жителей.

По причине очень интенсивного влияния максимального варианта в местном и региональном масштабах были разработаны варианты с менее интенсивным ростом населения. На рис 11 показаны варианты для округов штата Колорадо, где добываются горючие сланцы. Здесь прирост населения ограничен 10 и 5% в год. Как видно из вставок на рисунках, в этих вариантах снижены масштабы роста производства топлива по сравнению с



штриховано) и эксплуатацией предприятий по производству синтетического топлива в количестве 15900 м³/сут)
 ному варианту, 6 — предприятия округов Гарфилд, штат Колорадо Расчет произведе
 прироста населения 10%

максимальным вариантом с целью сохранения уровня жизни населения, живущего в данном регионе. В частности, по варианту с 10%-ным приростом населения в год в 2000 г. будет производиться топлива около 238,5 тыс м³/сут по сравнению с 318 тыс м³/сут по максимальному варианту. Соответственно для 1985 г. получится 31,8 тыс. м³/сут, что значительно меньше намеченного Вашингтоном показателя — 55,7 м³/сут. При 5%-ном приросте населения производство топлива может достичь в 1985 г. всего 15,9 тыс м³/сут и 63,6 тыс м³/сут в 2000 г.

Вода. Из табл. 2 следует, что завод по сжиганию угля производительностью 15 900 м³/сут топлива потребляет 37 050 тыс м³

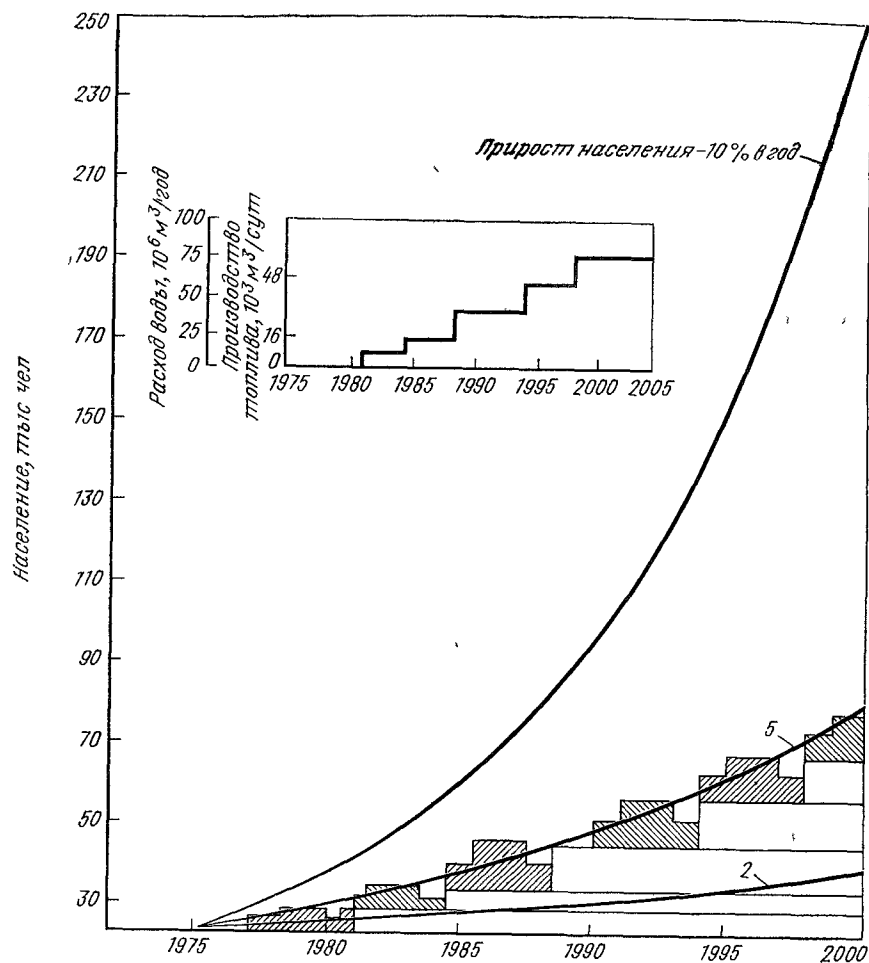


Рис 11 Вариант расчета численности населения для случая, показанного на рис 11, б, но произведенный из условия годового прироста населения 5%

воды в год. Примерно 80% воды теряется на испарение и более половины остальной части расходуется с химикатами. Системы экономии воды могут позволить сократить ее расход в 2—3 раза.

Хорошо известно, что богатые углем и горючими сланцами регионы, расположенные на Западе страны, бедны водой. Проблема водоснабжения является основной проблемой, от решения которой зависит разработка энергетических ресурсов Западной страны. Трудности удовлетворения потребности в воде зачастую перевешивают эффект стимулирования разработки месторождений открытым способом.

В связи с дефицитом воды на Западе страны законы ее использования там отличаются от законов на Востоке страны. На

Западе вода может являться частной собственностью независимо от прибрежных участков. А иногда бывает так, что владелец прибрежных участков не имеет никаких прав на воду, которая протекает по его территории.

В течение многих лет накопилось большое число заявок на право владения водой. Причем зачастую их набиралось столько, что если бы все заявки были удовлетворены и претворены в жизнь, то расход рек был бы исчерпан более чем на 100%. Такое абсурдное и невозможное положение было предотвращено только благодаря тому, что многие из заявок не были удовлетворены и, кроме того, было построено много сооружений, соединяющих между собой различные водные бассейны.

В настоящее время основными потребителями воды в рассматриваемых регионах являются владельцы ранчо и ферм. Бюро освоения земель соорудило много дамб для обеспечения водой сельскохозяйственных угодий. Такая вода не может быть использована для удовлетворения потребности энергетических проектов. Конъюнктурный анализ показал, что стоимость воды не окажет существенного влияния на стоимость жидкого синтетического топлива. Промышленность по производству синтетического топлива может выплачивать огромные суммы за потребляемую воду, стоимость которой может оказать лишь незначительное влияние на стоимость продукции. Возможность того, что энергетическая промышленность может купить право на воду, и тем самым нанести ущерб сельскому хозяйству, являющемуся основной базой жизни этих регионов, вызвала серьезную озабоченность местного населения и их представителей в правительствах штатов.

Возможно, что на Западе имеются достаточные ресурсы воды для обеспечения значительных нужд производства жидкого синтетического топлива, но она зачастую находится либо в неподходящем месте, либо ею нельзя пользоваться в силу законодательных ограничений. Проблема развития производства жидкого синтетического топлива на Западе страны тесно связана с выдачей прав на пользование водой. Получение этих прав затрудняется тем, что большая часть территории Западной страны находится в государственном владении, контролируется Федеральным правительством и федеральные права на воду имеют приоритет. Таким образом, политика федерального правительства в отношении производства синтетического топлива имеет решающее значение. Более того, обсуждается вопрос о статусе прав индейцев на воду. Согласно некоторым интерпретациям, их права датируются более ранним сроком, чем все остальные. Следовательно, племена индейцев могут держать в своих руках ключи к развитию производства синтетического топлива.

Наиболее вероятно, что решение проблемы о выдаче прав на воду будет происходить в течение длительного периода постепенно от района к району, от решения одной проблемы к другой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы считаем, что ответственные государственные и частные лица должны сравнить различные варианты решения обсуждаемых вопросов на основании следующих критериев: наличия ресурсов (ископаемых, воды, рабочей силы, капитала, земли), географической концентрации производства, влияния на человека и остальную живую природу, чистого энергетического соотношения, альтернативного использования имеющихся ресурсов, аспектов развития систем.

К наиболее важным проблемам, от которых зависит определение будущего жидкого синтетического топлива, по нашему мнению, относятся следующие: решение вопроса о выборе производства обычного или синтетического топлива, высокие темпы роста населения в районах производства синтетического топлива, восстановление рельефа местности после горных работ, ресурсы воды и конфликты, связанные с ее использованием, финансирование производства синтетического топлива, предотвращение загрязнения районов производства синтетического топлива.

В целом, очевидно, ни один из вариантов производства синтетического топлива по всем аспектам не является лучшим, учитывая экологические, социальные и общественные факторы. Это прежде всего относится к регионам, в которых будут разрабатываться месторождения и производиться само топливо.

ОБСУЖДЕНИЕ

А. Р. Сапре (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Каким, согласно Вашим расчетам, будет потребление природных нефти и газа?

Диксон. Согласно нашим предположениям, темпы роста потребления природных нефти и газа будут соответствовать варианту отчета по проекту энергетической политики Фонда Форда с максимальным темпом роста.

Сапре. Относятся ли Ваши темпы инфляции в размере 8% в год к требующимся капиталовложениям, а также к ценам на нефть и природный газ?

Диксон. Они относятся к каждому доллару, который вкладывается в дело в данный год.

Сапре. Каким образом Вы пришли к показателю инфляции в 8%?

Диксон. Мы просчитали варианты с 0,5 и 8%. Стало так жутко, что варианты с более высокими темпами инфляции мы уже не хотели просчитывать.

Сапре. Пытались ли Вы провести какой-либо межотраслевой анализ для всей системы, в том числе и для производства синтетического топлива, с целью установления ограничивающих факторов, которые будут сдерживать развитие промышленности производства синтетического топлива из-за конкуренции, обусловлен-

ной недостаточностью капиталов, рабочей силы, материалов и т. п.?

Диксон. Представленные нами графики являлись попыткой ответа на этот вопрос. Однако мы не могли создать матричную модель для всей экономики в целом. Это было невозможно. Мы пытались сравнить полученные нами показатели с прогнозом других потребностей в капитале. В результате сравнения нами был сделан вывод, что доля нефтяной промышленности в экономике должна остаться более или менее близкой к традиционной.

Сапре. Вы включили в расчеты потребность в энергии для сооружения заводов, оборудования и т. д. Не начинали ли Вы свои расчеты с железной руды с последующим переходом от нее к оборудованию?

Диксон. Да.

Сапре. Вы говорили, что процессы производства синтетического топлива требуют много воды. Во вчерашнем выступлении доктор Гери говорил, что расходуется большое количество воды при добыче горючих сланцев. Имеете ли Вы в виду дополнительные потребности в воде или речь идет о той же воде, которая требуется для добычи и удаления отходов переработки горючих сланцев?

Диксон. Ответом на первую часть Вашего вопроса будет «да», еще больше воды. Но это «да» включает в себя потребность воды на добычу и удаление отходов переработки горючих сланцев.

Дж. П. Лонгвелл (фирма «МИТ энд Эксон»). Если использовать местную солоноватую воду, то в ряде случаев это может значительно снизить финансовое бремя в производстве синтетического топлива.

Диксон. Одной из проблем, на которой я не останавливался при рассмотрении вопросов, касающихся обеспечения водой, является неясность перспектив возможности использования грунтовых вод. Ресурсы грунтовых вод, например, в регионе месторождений горючих сланцев, неизвестны. Пробурено несколько опытных скважин и имеются некоторые соображения относительно количества водных ресурсов, однако данные пока не очень точны. Предполагается, что большие ресурсы воды имеются в формации Медисон в бассейне Паудер Ривер, но полагают, что это вода соленая и ни для чего не пригодна. Однако после того, как недавно было пробурено несколько скважин, вода оказалась менее соленой, чем используемая в настоящее время в Джиллете, штат Вайоминг. В общем требуются дополнительные исследования этого вопроса.

Дж. В. Пэнгборн (Институт газовой технологии). На основании Вашей работы трудно точно оценить перспективы развития промышленности по производству синтетического газа. Многие считают, что использование угля для получения синтетического газа более перспективно, чем производство жидкого син-

тетического топлива и метанола. Что можно было бы сказать о технических, социальных и экономических последствиях перехода на производство синтетического газа дополнительно к тому, о чем Вы уже говорили?

Диксон. По случайному совпадению оказалось, что капитальные затраты, потребность в материалах, проблемы географического размещения и состава населения для сооружения заводов по производству синтетического жидкого топлива совпадают с аналогичными потребностями для производства синтетического газа. Поэтому модели, построенные нами для исследования влияния различных факторов на производство жидкого синтетического топлива, могут быть использованы и для анализа перспектив развития промышленности по производству синтетического газа.

Пэнгборн. А можно ли получать и жидкие и газообразные синтетические топлива?

Диксон. Можно, если мы сумеем решить социальные проблемы и пойдем на более быстрое, чем обычное, истощение запасов угля, добываемого открытым способом.

Р. А. Хастед (Министерство транспорта США). Могли бы Вы сказать о возможности и соответственно стоимости доставки воды из каких-либо крупных источников?

Диксон. Мы, конечно, согласны с тем, что стоимость воды почти не имеет никакого значения. Вода, приходящаяся на производство бареля (159 л) топлива, стоит всего несколько центов. Производители жидкого синтетического топлива могут платить за воду в 4, 5 и даже в 10 раз больше, чем работники сельского хозяйства, не опасаясь, что потребитель их продукции почувствует разницу в стоимости. Реальная стоимость заключается в расходах, связанных с осуществлением общегосударственных мероприятий по транспортированию воды между бассейнами. В этом случае дополнительные издержки увеличат стоимость проекта и он может рухнуть.

Мы рассматривали также вопрос о транспортировании угля за пределы региона и установили, что в этом деле имеется слишком много сложностей как в местах добычи угля, так и в местах его переработки. Нами изучалась и возможность экономии воды за счет транспортирования угля в пульпопроводах. При этом рассматривались варианты с двойными трубопроводами, по одному из которых грязная вода должна была доставляться обратно для повторного и многократного использования. Однако воду нельзя использовать многократно, так как при каждой перекачке угля 25% воды теряется, потому что уголь в приемном пункте остается влажным. Мы пришли к выводу, что лучше платить сотни долларов за 1 тыс. м³ воды, т. е. намного больше, чем за нее платят в сельском хозяйстве. Таким образом, можно было бы выйти из затруднительного положения, закупив права сельских производителей на воду, если это удастся.

Р. У. Харн (Управление энергетических исследований и разработок США). В отчете группы по промышленному внедрению

синтетического топлива четко отдается предпочтение варианту его производства из горючих сланцев. Этот отчет был подготовлен *SRI*. Каково Ваше мнение по этому поводу?

Диксон. *SRI* представляет собой монстра с несколькими головами. Согласно отчетам Эксон и *IGT*, в которых за отправные данные берется стоимость добычи, приоритет отдается горючим сланцам. Если брать за основу наш чистый энергетический анализ, то получится то же самое. Однако в отчете *SRI* не учитываются влияние на окружающую среду, или на общественные проблемы, и даже реальные ресурсы воды.

С. Дж. Лиддл (Исследовательские лаборатории фирмы «Дженерал моторс»). Не лучше ли было сооружать подобные заводы, учитывая проблемы населения и ресурсов воды, в восточных районах страны?

Диксон. Что касается горючих сланцев, то их можно добывать и перерабатывать только на Западе страны. Согласно нашим расчетам, производство синтетического топлива из угля можно было бы наладить в южных районах штата Иллинойс. Здесь легче восстановить разработанные участки и вновь использовать их для сельского хозяйства. Кроме того, имеются достаточные ресурсы воды и ее использование не вызовет затруднений. Население региона обеспечит потребности в рабочей силе без такого напряжения, как это могло бы быть в некоторых западных районах. Однако в Южном Иллинойсе нельзя создавать крупную промышленность из-за недостаточности ресурсов угля на длительный период.

Е. Е. Спилтер (Исследовательская компания «Шеврон рисёрч»). Вы говорили, что потребности в автомобильном топливе составят примерно 800 тыс. м³/сут. Касается это автомобилей в широком смысле слова или только легковых.

Диксон. Это относится к легковым, грузовым автомобилям и автобусам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К докладу «Прогноз потребности в автомобильном топливе»:

а) Используемая литература:

1. F. C. Wykoff, «A User cost Approach to New Automobile Purchases», Review of Economic Studies, Vol. XL(3), No. 123 July 1973, pp. 377—390.
2. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, «Nationwide Personal Transportation Study», 1974.
3. «Survey of Consumer Finances», Survey Research Center, Institute for Social Research, University of Michigan.
4. U. S. Department of Commerce, «Current Population Reports», Series P-65.
5. G. C. Chow, «Demand for Automobiles in the United States», North Holland Press, Amsterdam, 1957.
6. M. Nerlove, «A Note on Long-Run Automobile Demand», Journal of Marketing, Vol. 22, July 1957.
7. M. J. Hamburger, «Interest Rates and the Demand for Consumer Durable Goods», American Economic Review, Vol. 57, December 1967.

б) Библиография:

1. L. J. Attkinsson, «Consumer Markets for Durable Goods», Survey of Current Business, April 1952.
2. Business Week, December 14, 1974, p. 62.
3. Chase Econometrics Associates, «The Effects of Tax and Regulatory Alternatives on Car Sales and Gasoline Consumption», prepared for the Council on Environmental Quality, NTIS PB 234 622, May 1974.
4. T. R. Dyckman, «An Aggregate Demand Model for Automobiles», Journal of Business, Vol. 38, July 1965.
5. H. S. Houthakker and L. D. Taylor, «Consumer Demand in the United States 1929—1970», Cambridge, 1966.
6. C. F. Roos and V. von Szelski, «Factors Governing in Domestic Automobile Demand», The Dynamics of Automobile Demand, New York, 1939.
7. R. E. Mellman, «A Critical Analysis of Automobile Demand Studies», Transportation Systems Center Report No. WP—210—U2—84, 1975.
8. R. Schuessler and R. Smith, «Working Models of Fuel Consumption, Emissions and Safety Related to Auto Usage and Purchasing Behavior», Transportation Systems Center Report WP—230—U2—52, 1974.
9. D. B. Suits, «The Demand for New Automobiles in the United States, 1929—1956», Review of Economics and Statistics, Vol. 39, November 1958.
10. White, «The Automobile Industry Since 1945», 1971.
11. Wildhorn, B. K. Burright, J. Enns and T. Kirkwood, «How to Save Gasoline: Public Policy Alternatives for the Automobile», Santa Monica: The Rand Corporation, 1974.
12. D. B. Suits, «Administered Prices», Part 7, Senate Antitrust Subcommittee Staff Report, 1958, pp. 3998—3999.

К докладу «Экономия энергии и оптимизация системы «топливо—автомобиль».

1. E. S. Corner and A. R. Cunningham, «Value of High Octane Number Unleaded Gasolines in the U. S.», presented before the Division of Water, Air and Waste. Chemistry of the American Chemical Society, Los Angeles, California, March 28—April 2, 1971.
2. M. M. Roensh, «Thermal Efficiency and Mechanical Losses of Automotive Engines», Society of Automotive Engineers Journal, Vol. 51, 1949 pp. 17—30.
3. F. H. Kant, et. al., «Effects of Changing the Proportions of Automotive and Gasoline Produced by Petroleum Refining», Environmental Protection Agency Report 460/3—74—018, July 1974.

К докладу «Возможности максимальной экономии энергии на транспорте»

1. «A National Plan for Energy Research, Development and Demonstration: Creating Energy Choices for the Future», United States Energy Research and Development Administration, Volume 1, ERDA—48. June 28, 1975.
2. P. E. Oberdorfer, «Compression Ratio, Emissions, Octanes and Fuel Economy—Experimental Study», Paper No. 60—72, API Division of Refining, 37 th Midyear Meeting, May 11, 1972.
3. A. E. Felt and S. R. Krause, Ethyl Corporation, «Effect of Compression Ratio Changes on Exhaust Emissions», Society of Automotive Engineers National Combined Fuels and Lubricants, Powerplant and Truck Meeting, October 26—29, 1971.
4. Clayton LaPointe, Ford Motor Company, «Factors Affecting Vehicle Fuel Economy», Paper No. 730791, SAE Combined National Farm, Construction, Industrial Machinery and Lubricants Meeting and Manufacturing Forum, Milwaukee, Wisconsin, September 11, 1973.
5. L. E. Furlong, E. L. Holt and L. S. Bernstein, Esso Research and Engineering, «Emission Control and Fuel Economy», American Chemical Society, Los Angeles, California, April 1, 1974.
6. «Gasoline Saved Equals Crude Conserved», Air Conservation Notes Number 75—1, Ethyl Corporation, January 1975.
7. «Statement of Rudolf Uhlenhaut, Director, Passenger Car Development—Daimler-Benz Aktiengesellschaft», Before the Panel Environmental Science and Technology Subcommittee on Air and Water Pollution—U. S. Senate Committee on Public Works, March 14, 1972.
8. N. W. Barnes — Moss and W. M. Scott, Ricardo and Co., Engineers, Inc., «The High Speed Diesel Engine for Passenger Cars», The Institution of Mechanical Engineers Conference Power Plants and Future Fuels, London, England, January 21—22, 1975.
9. «Emissions from Diesel and Stratified Charge Power Cars», EPA—460/3—75—001—a, United States Environmental Protection Agency, December 1974.
10. Gerhard Finsterwalder, «The New Deutz Multi-Fuel System», Paper No. 720103, Automotive Engineering Congress, Detroit, Michigan, January 10—14, 1972.
11. H. Hagan, P. Kuhlmann and A. Urlaub, «M. A. N. Activities in Power Plants for the Future», Paper No. c36/75, Conference on Power Plants and Future Fuels, The Institution of Mechanical Engineers, London, England, January 21—22, 1975.
12. W. T. Tierney, E. Mitchell and M. Alperstein, Texaco, Inc., «The Texaco Controlled—Combustion System—A Stratified Charge Engine Concept—Review and Current Status», Paper No. C1—75, The Institution of Mechanical Engineers' Power Plants and Future Fuels Conference, London, England, January 21—22, 1975.
13. W. T. Tierney, E. M. Johnson and N. R. Crawford, Texaco, Inc., «Energy Conservation—Optimization of the Vehicle—Fuel—Refinery System», SAE Paper No. 750673, SAE Fuels and Lubricants Meeting, Houston, Texas, June 3—5, 1975.
14. Karl J. Springer, Southwest Research Institute, and Ralph C. Stahman, Environmental Protection Agency, «Emissions and Economy of Four Diesel Cars», SAE Paper No. 750332, 1975 Automotive Engineering Congress Exposition, Detroit, Michigan, February 24—28, 1975.
15. Mineral Industry Surveys, United States Department of Interior, Bureau of Mines, Petroleum Product Surveys, No. 75. No. 76, No. 78 and No. 79.

16. Mineral Industry Surveys, United States Department of Interior, Bureau of Mines, Petroleum Statement, Annual Crude Petroleum, Petroleum Products and Natural Gas Liquids: 1972.
17. Oil and Gas Journal, Annual Refining Issue, April 2, 1973.
18. Oil and Gas Journal December 25, 1972.
19. National Petroleum News Factbook, Issue, Mid-May, 1973.
20. Minerals Yearbook, Vol. 1. United States Department of Interior, Bureau of Mines, 1972.
21. «Refinery and Petrochemical Modeling System», Software Systems, Bonner and Moore, Houston, Texas.
22. 1973-74 Automobile Facts and Figures—Motor Vehicle Manufacturers Association of the United States, Inc., Detroit, Michigan.

К докладу «Выбор автомобильных топлив и двигателей для достижения оптимальной энергетической эффективности в будущем»

1. P. F. Chapman, «Energy Costs: A Review of Methods», Energy Policy, June 1974.
2. R. H. Williams, Editor, «The Energy Conservation Papers», Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, 1975.
3. F. H. Kant, et al., «Feasibility Study of Alternative Fuels for Automotive Transportation», Vol. I, II and III, ERA-460/3-74-009-a, b, c, U. S. Environmental Protection Agency, Ann Arbor, Michigan, June 1974.
4. J. Pangborn and J. Gillis, «Alternative Fuels for Automotive Transportation—A Feasibility Study», Vol. I, II and III, EPA-460/3-74-012-a, b, c, U. S. Environmental Protection Agency Ann Arbor, Michigan, July 1974.
5. W. L. Nelson, «Guide to Refinery Operating Costs», The Petroleum Publishing Co., Tulsa, Oklahoma, 1970.
6. W. T. Tierney, E. M. Johnson and N. R. Crawford, «Energy Conservation Optimization of the Vehicle—Fuel Refinery System», SAE Paper No. 750673, Fuels and Lubricants Meeting, Houston, Texas, June 1975.
7. F. H. Kant, A. R. Cunningham and M. H. Farmer, «Effects of Changing the Proportions of Automotive Distillate and Gasoline Produced by Petroleum Refining», EPA-460/3-74-018, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C., July 1974.
8. «The Potential for Energy Conservation in Nine Selected Industries—Petroleum Refining» Conservation Paper No. 10, Federal Energy Administration, Washington, D. C., 1975.
9. K. C. Vyas, «Coal and Oil—Shale Conversion Looks Better», Oil and Gas Journal, August 26, 1974.
10. F. L. Hartley, «Oil Shale: Another Source of Oil for the United States», Oil Daily's Third Annual Synthetic Energy Forum, New York, June 10, 1974.
11. A. E. Harak, L. Dockter, A. Long and H. W. Sohn, «Oil Shale Retorting in a 150-Ton Batch—Type Pilot Plant», Investigations 7995, U. S. Bureau of Mines, 1974.
12. D. P. Montgomery, «Refining of Pyrolytic Shale Oil», 155th National Meeting, Chemical Society, San Francisco, California, April 2-5, 1968.
13. R. L. Wise, R. C. Miller and H. W. Sohns, «Heat Contents of Some Green River of Oil Shales», Report of Investigations 7483, U. S. Bureau of Mines, 1971.
14. S. K. Kunchal, «Energy and Dollar Requirements in an Oil Shale Industry», 170th National Meeting, American Chemical Society, Chicago, Illinois, August 1975.
15. T. A. Hendrickson, «Oil Shale Processing Methods», Quarterly of the Colorado School of Mines, Vol. 69, No. 2, April 1974.
16. L. G. Austin, «Note on Rittinger's Law of Grinding», Transactions of Society of Mining Engineers, Vol. 254, December 1973.
17. S. R. S. Sastri and K. S. Narasimhan, «Predicting Grindingmill Energy Use», Chemical Engineering, September 1, 1975.
18. «U. S. Energy Outlook—Coal Availability», National Petroleum Council, U. S. Dept. of the Interior, Washington, D. C., 1973.
19. «Liquefaction and Chemical Refining of Coal», A Battelle Energy Program Report, Battelle Columbus Laboratories, July 1974.

20. W. W. Bodle and K. C. Ys, «Clean Fuels from Coal», Oil and Gas Journal, August 1974.
21. S. Akhtar, et al., «Synthoil Process for Converting Coal to Non-Polluting Fuel Oil», «4th Synthetic Fuels from Coal Conference», Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, May 6-7, 1974.
22. L. Grainger, «Energy Conversion Technology in Western Europe», «Phil. Trans. R. Soc. Lond.», A. 276, 1974, pp. 527-539.
23. J. H. Gary, «Liquid Fuels and Chemicals from Coal», «Mineral Industries Bulletin No. 5, Colorado School of Mines Research Institute, September 1969».
24. H. E. Jacobs, J. F. Jones and R. T. Eddinger, «Hydrogeneration of COED Process—Derived Oils», «Industrial and Engineering Chemistry Vol. 10, No. 4, 1971».
25. H. H. Lowry, «Chemistry of Coal Utilization», John Wiley and Sons, Inc. New York, New York, 1963.
26. «Engineering Evaluation of Project Gasoline—CONSOL Synthetic Fuel Process», R and D Report No. 59, Office of Coal Research, U. S. Dept. of the Interior, Washington, D. C., July, 1970.
27. «Engineering Evaluation and Review of CONSOL Synthetic Fuel Process», R and D Report No. 70, Office of Coal Research, U. S. Dept. of the Interior, Washington, D. C., February 1972.
28. A. L. Coun and J. B. Corns, «Evaluation of Project H—Coal», Contract 14-01-0001-1188, Office of Coal Research, U. S. Dept. of the Interior, Washington, D. C., 1967.
29. S. Akhtar, J. J. Lacey and M. Weintraub, «The SYNTHOIL Process—Material Balance and Thermal Efficiency», 67th Annual AIChE Meeting, Washington, D. C., December 1974.
30. H. H. Storch, N. Columbic and R. B. Anderson, «The Fischer—Tropsch and Related Syntheses», John Wiley and Sons, Inc., New York, New York, 1951.
31. S. Katell, «10,000 BPD Fischer—Tropsch—Synthesis Plant», Report No. 5867, U. S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D. C., August 1958.
32. J. C. Hoogendoorn, «Fischer—Tropsch Process», Clean Fuel from Coal Symposium, Institute of Gas Technology, Chicago, Illinois, September 10-14, 1973.
33. J. S. S. Brame and J. C. King, «FUEL Solid, Liquid and Gaseous», St. Martin's Press, New York, New York, 1967.
34. G. K. Goldman, «Liquid Fuels from Coal», Noyes Data Corp., 1972.
35. W. A. Scheller and B. J. Mohr, «Production of Ethanol and Vegetable Protein by Grain Fermentation», 169th National Meeting American Chemical Society, Philadelphia, Pennsylvania, April 1975.
36. R. G. Sheehai and R. F. Corlett, «Methanol or Ammonia Production from Solid Wastes by the City of Seattle», 196th National Meeting, American Chemical Society, Philadelphia, Pennsylvania, April 1975.
37. D. L. Klass and S. Ghosh, «Fuel Gas from Organic Wastes», Chemtech, November 1973.
38. A. H. Brown, «Bioconversion of Solar Energy», Chemtech, July 1975.
39. C. Marchetti, «Hydrogen and Energy», Chemical Economy and Engineering Review, Vol. 5, No. 1, January 1973.
40. R. L. Savage, et al., «A Hydrogen Energy Carrier», Vol. I, N74-11727, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, 1973.
41. M. Steiberg, «A Review of Nuclear Sources of Non-Fossil Chemical Fuels», Energy Sources, Vol. I, No. 1, 1973.
42. J. R. Garvey, «Future Development in Coal—Fired Powerplants», Proceedings of American Power Conference, Vol. XXIX, 1967.
43. «Fuels for the Electric Utility Industry 1971-1985», Edison Electric Institute, New York, New York, 1973.
44. D. A. Tillman, «Fuels from Recycling Systems», Environmental Science and Technology, Vol. 9, No. 5, May 1975.
45. H. W. Schulz, «Cost/Benefits of Solid Waste Reuse», Environmental Science and Technology, Vol. 9, No. 5, May 1975.
46. W. Tipler, «Energy Economics of Automotive Power Generation», SAE Paper No. 750761, 1975 SAE Off-Highway Vehicle Meeting, Milwaukee, Wisconsin, September 1975.

47. H. B. Jenson, J. R. Morandi and G. L. Cook, «Characterization of the Saturates and Olefins in Shale Oil Gas», 155th National Meeting, American Chemical Society, San Francisco, California, April 1968.

48. H. E. Carver, «Conversion of Oil Shale to Refined Products», Quarterly of the Colorado School of Mines, Vol. 59, No. 3, July 1964, pp. 19—38.

49. J. R. Morandi and R. E. Poulson, «Nitrogen Types in Light Distillates from Aboveground and In Situ Combustion Produced Shale Oils», 169th National Meeting, American Chemical Society, Philadelphia, Pennsylvania, April 1975.

50. R. E. Poulson, «Nitrogen and Sulfur in Raw and Refined Shale Oils», 169th National Meeting, American Chemical Society, Philadelphia, Pennsylvania, April 1975.

51. F. S. Eisen, «Preparation of Gas Turbine Engine Fuel from Synthetic Crude Oil derived from Coal, Phase II, Final Report», AD/A—007 923, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, February 1975.

52. G. R. Hill and L. B. Lyon, «A New Chemical Structure for Coal», Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 54, No. 6, June 1962.

53. H. W. Sterberg, R. Raymond and S. Akhtar, «SYNTHOIL Process and Product Analysis», 169th National Meeting, American Chemical Society, Philadelphia, Pennsylvania, April 1975.

54. R. H. Wolk, N. C. Stewart and H. F. Silver, «Review of Desulfurization and Denitrogenation in Coal Liquefaction», 169th National Meeting, American Chemical Society, Philadelphia, Pennsylvania, April 1975.

55. «1974 General Motors Report on Programs of Public Interest», General Motors Corporation, Detroit, Michigan, April 15, 1975.

56. W. J. Schultz, C. E. Miesiak, A. L. Hamilton and D. E. Loarkinson, «Credibility of Diesel Over Gasoline Fuel Economy Claims by Association», SAE Paper No. 760047, Automotive Engineering Congress, Detroit, Michigan, February 1976.

57. «Motor Trend», January 1976, p. 30.

К докладу «Производство и свойства моторного топлива, полученного из горючих сланцев»

1. U. S. Dept. of Interior, Final Environmental Statement for the Prototype Oil Shale Leasing Program, 12, 1973.

2. Anon, Colorado School of Mines Quarterly, 17 (4), 1922, p. 34.

3. C. M. Frost, H. C. Carpenter, C. B. Hopkins, S. S. Tihen and P. L. Cottingham, U. S. Bur. Mines Rept. Inv. 5574, 1960, 17 pp.

4. B. F. Grant, Colorado School of Mines Quarterly, 59 (3), 1964, pp. 39—46.

5. V. D. Allread, Colorado School of Mines Quarterly, 59 (3), 1964, pp. 47—73.

6. J. H. Gary, World Oil, 161 (2), 1965, pp. 98—101.

7. E. D. Burger, D. J. Curting, G. A. Myers and D. K. Wunderlich, Amer. Chem. Soc., Div. of Petroleum Chem. Preprints, p. 765—775., Chicago, August 24—29, 1975.

8. Applied Systems, Corp., Executive Summary Report: «The Production and Refining of 10,000 Barrels of Crude Shale Oil into Military Fuels», Office of Naval Res., Contract N00014—75—0055, June 1975.

9. P. L. Cottingham, E. R. White and C. M. Frost, Ind. Eng. Chem., 49 (4), 1957, pp. 679—684.

10. M. O. Rosenheimer and J. R. Kivovsky, Preprints, Div. of Petrol Chem., A. C. S., 12 (4), 1967, pp. B 147—B164.

11. P. L. Cottingham and L. G. Nickerson, Amer. Chem. Soc., Div. of Petroleum Chem. Preprints, Philadelphia Meeting, April 6—11, 1975, pp. 535—541.

К докладу «Влияние ядерной энергии на топливо для транспорта»

1. «A National Plan for Energy Research, Development, and Demonstration», ERDA—48, Vol. 2 of 2.

2. «Nuclear Power Growth, 1974—2000», WASH—1139 (74), February, 1974.

3. R. N. Quade, «High-Temperature Gas-Cooled Reactors for Process Heat», Power Engineering, April 1973.

4. J. L. Russel, Jr., «Nuclear Splitting and the Hydrogen Economy», Power Engineering, April 1974.

К докладу «Использование новых методов анализа для исследования характеристик новых видов топлива и отработавших газов»

1. R. T. Johnson, «Energy and Synthetic Fuels for Transportation», SAE Paper No. 740599, presented at SAE West Coast Meeting, Anaheim, California, August 1974.

2. J. A. Bolt, «A Survey of Alcohol as a Motor Fuel», SAE Special Publication 254, New York, 1964.

3. E. S. Starkman, J. H. Newhall and R. D. Sutton, «Comparative Performance Hydrocarbon Fuels», SAE Special Publication 254, New York, 1964.

4. R. K. Pefley, S. A. Sweeney and J. D. Kilgroe, «Performance and Emission Characteristics Using Blends of Methanol and Dissociated Methanol as an Automotive Fuel», Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Paper No. 719008, SAE New York, 1971, p. 38.

5. G. D. Ebersole and F. S. Manning, «Engine Performance and Exhaust Emissions: Methanol versus Isooctane», SAE Paper No. 720692, presented at National West Coast Meeting, San Francisco, August 1972.

6. J. A. Harrington and R. M. Pilot, «Combustion and Emission Characteristics of Methanol», SAE Paper No. 750420, presented at SAE Congress, Detroit, Michigan, February 1975.

7. R. F. Sawyer, E. S. Starkman, L. Muzio and W. L. Schmidt, «Oxides of Nitrogen in the Combustion Products of an Ammonia Fueled Reciprocating Engine», SAE Paper No. 680401, presented at SAE Mid Year Meeting, Detroit, Michigan, May 1968.

8. R. W. Reynolds, J. S. Smith and I. Steinmetz, «Methyl Ethers as Motor Fuel Components», presented at 168th National Meeting of ACS Division of Petroleum Chemistry, Atlantic City, New Jersey, September 1974.

9. W. J. Most and J. P. Longwell, «Single Cylinder Engine Evaluation of Methanol—Improved Energy Economy and Reduced Nox», SAE Paper No. 750119, presented at SAE Congress, Detroit, Michigan, February 1975.

10. M. W. Dondy, J. F. Stocky and T. G. Vanderburg, «An Examination of the Performance of Spark Ignition Engines Using Hydrogen Supplemented Fuels», SAE Paper No. 750027, presented at SAE Congress, Detroit, Michigan, February 1975.

11. R. F. Štebar and F. B. Parks, «Emission Control with Lean Operation Using Hydrogen—Supplemented Fuels», SAE Paper No. 740187, presented at SAE Congress, Detroit, Michigan, February 1974.

12. G. W. Rassweiler and L. L. Withrow, «Motion Pictures of Engine Flames Correlated with Pressure Cards», SAE Transactions, Vol. 38, May 1938, pp. 185—204.

13. B. D. Peters and G. L. Borman, «Cyclic Variations and Average Burning Rates in an S. I. Engine», SAE Paper No. 700064, presented at Automotive Engineering Congress, Detroit, Michigan, January 1970.

14. D. R. Lancaster, R. B. Krieger and J. H. Lienesch, «Measurement and Analysis of Engine Pressure Data», SAE Paper No. 7500026, presented at Automotive Engineering Congress, Detroit Michigan, February 1975.

15. S. Currey, «A Three Dimensional Study of Flame Propagation in a Spark Ignition Engine», SAE Paper No. 62—452B, Presented at Automotive Engineering Conference Detroit Michigan, January 1962.

16. G. A. Harrow, P. L. Orman and G. B. Toft, «The Effects of Engine Operating Variables on the Time of Flame Propagation in a Spark Ignition Engine», J. Inst. Petroleum, Vol. 4, No. 475, pp. 204—214.

17. E. S. Starkman, F. M. Strange and T. J. Dahm, «Flame Speeds and Pressure Rise Rates in Spark Ignition Engines», SAE Paper No. 59—83V, Presented at SAE International West Coast Meeting, Vancouver, B. C., August 1959.

18. E. S. Starkman and G. S. Samuelson, «Flame Propagation Rates in Ammonia—Air Combustion at High Pressure», 11th Symposium on Combustion, the Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1967, pp. 1037—1045.

19. L. C. Lishy, «Combustion Engines Processes», McGraw—Hill, New York, 1967.

6. J. J. Fagelson, W. J. McLean and P. C. T. de Boer, «Analysis of Hydrogen as a Reciprocating Engine Fuel», Preprints 20, ACS Division of Petroleum Chemistry, 1975, pp. 114—126.

7. R. F. Stebar and F. B. Parks, «Emission Control with Lean Operation Using Hydrogen—Supplemented Fuel», SAE Paper No. 740187, 1974.

8. J. J. Fagelson, «Hydrogen as a Reciprocating Engine Fuel: An Analytical Study», M. S. Thesis, Cornell University, 1975.

9. P. C. T. de Boer, W. J. McLean, J. J. Fagelson and H. S. Homan, «An Analytical and Experimental Study of the Performance and Emissions of a Hydrogen Fueled Reciprocating Engine», Proceedings 9th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1974, pp. 479—486.

10. H. Niki, A. Warnick and R. R. Lord, «An Ozone—NO Chemiluminescence Method for NO Analysis in Piston and Engines», Transactions, Society of Automotive Engineers, Paper No. 710072, 1971.

11. R. G. Murray and R. J. Schoepel, «Emission and Performance Characteristics of an Air—Breathing Hydrogen—Fueled Internal Combustion Engine», Proceedings 1971 Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1971, pp. 47—51.

12. E. J. Griffith, «Hydrogen Fuel», Nature 248, 1974, p. 458.

13. J. J. Reilly, Private communication quoting results of test at Brookhaven National Laboratory.

14. M. Oehmichen, «Wasserstoff als Motortreibmittel», Verein Deutsche Ingenieur, Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 68, 1942.

15. M. R. Swain and R. R. Adt, «The Hydrogen—Air Fueled Automobile», Proceedings of the 7th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1972, p. 1382.

К докладу «Азотоводородные соединения в качестве перспективного автомобильного топлива»

1. E. S. Starkman, et al., «Ammonia as a Spark Ignition Engine Fuel: Theory and Application», SAE Paper No. 660155, Society of Automotive Engineers.

2. W. Cornelius, L. Huellmantel and H. Mitchell, «Ammonia as an Engine Fuel», SAE Paper No. 650052, SAE Transactions, 74, 300—15, 1966.

3. R. F. Sawyer, et al., «Oxides of Nitrogen in the Combustion Products of an Ammonia—Fueled Reciprocating Engine», SAE Paper No. 680401, Society of Automotive Engineers.

4. R. Sutton and E. S. Starkman, «Oxides of Nitrogen in the Engine Exhaust with Ammonia Fuel», California University, Berkeley, Report TS—66—4, TR—7, Contract Da 04—2000—AMS—791—X, June 1966, AD 640444, N67—21718, p. 27.

5. J. T. Gray, et al., «Ammonia Fuel—Engine Compatibility and Combustion», SAE Paper No. 660156, 1966.

6. R. D. Reed, «RPRV's—The First and Future Flights» Astronautics and Aeronautics 26—42, April 1974.

7. M. K. Hubbert, «Energy Resources for Power Production, in: Environmental Aspects of Nuclear Power Stations», International Atomic Energy, Agency, Vienna, 1970, pp. 13—43.

8. Synthetic Fuels Panel: «Hydrogen and Other Synthetic Fuels», AEC TID 26136, N 73—33738, September 1972.

9. D. V. Sokolski, et al., «Reduction of Nitrogen to Hydrazine with Zinc in Presence of Vanadium and Magnesium Compounds», Russ. J. Gen. Chem., 42, 1415—7, 1972.

10. E. S. Starkman and G. S. Samuelisen, «Flame—Propagation Rates in Ammonia—Air Combustion at High Pressure», 11th Symp. Comb., A67—33844, 1967, pp. 1037—45.

11. M. G. Zabetakis, «Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors», U. S. Bureau of Mines Bulletin 627 (1965).

12. R. L. Graves, et al., «Ammonia as a Hydrogen Carrier and Its Application in a Vehicle», Hydrogen Economy Miami Conference, pgs. SB—15 to SB—23 (March 1974).

13. T. J. Pearsall and C. G. Garabedian, «Combustion of Anhydrous Ammonia in Diesel Engines», SAE Paper No. 670938 (1967).

К докладу «Влияние применения жидкого синтетического топлива на автомобильный рынок»

1. E. M. Dickson, et al., «Impacts of Synthetic Liquid Fuel Development for The Automotive Market», report in preparation for the Environmental Protection Agency, release expected in early 1976.

2. E. E. Hughes, et al., «Maximum Credible Implementation Scenario for Synthetic Liquid Fuels from Coal and Oil Shale», 10th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Newark, Delaware, August 17—22, 1975, pp. 658—666.

3. E. M. Dickson, «Decision—Making for Synthetic Fuels, 10th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Newark, Delaware, August 17—22, 1975, pp. 651—657.

4. Energy Policy Project of the Ford Foundation, «A Time to Choose: America's Energy Future» (Ballinger Publishing Co., Cambridge, Massachusetts), 1974.

5. J. E. Hass et al., «Financing the Energy», Industry (Ballinger Publishing Co., Cambridge, Massachusetts), 1974.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию	5
От редактора русского издания	7
Предисловие к американскому изданию	8

Первая часть

Автомобильные топлива (ресурсы, потребности и возможности их удовлетворения)

Р. Ф. ХЕМФИЛЛ младший, К. ДИФИЛИО. Прогноз потребности в автомобильном топливе	9
С. ДЖ. БОБЬЕН. Прогнозы обеспечения США энергией до 1990 г.	33
Х. Ф. ШЕННОН. Экономия энергии и оптимизация системы «топливо—автомобиль»	56
Е. М. ДЖОНСОН, У. Т. ТИРНЕЙ, Н. Р. КРОУФОРД. Возможности максимальной экономии энергии на транспорте	68
Р. Ф. СТЕБАР, В. А. ДАНИЭЛЬ, А. Р. САРПЕ, Б. Д. ПЕТЕРС. Выбор автомобильных топлив и двигателей для достижения оптимальной энергетической эффективности в будущем	90

Вторая часть

Источники перспективных видов автомобильного топлива

Е. Л. КЛАРК. Уголь как источник автомобильного топлива	112
ДЖ. Х. ГЕРИ. Производство и свойства моторного топлива, полученного из горючих сланцев	124
ДЖ. Л. РАССЕЛЛ. Влияние ядерной энергии на топливо для транспорта.	135

Третья часть

Ближайшие перспективы использования автомобильного топлива

Р. У. ХАРН. Характеристики обычных топлив, полученных из ненефтяных источников	148
ДЖ. А. ХАРРИНГТОН. Использование новых методов анализа для исследования характеристик новых видов топлива и отработавших газов	157
У. Е. БЕРНХАРДТ, У. ЛИ. Мощность двигателя и характеристика отработавших газов при эксплуатации автомобилей на метаноле	184

Л. У. ХЬЮЭЛЬМАНТЕЛЬ, С. Дж. ЛИДДЛ, Д. К. ХЭММОНД. Сгорание метанола в автомобильной газовой турбине	201
У. М. СКОТТ. Новые виды топлива для автомобильных дизелей	223

Четвертая часть

Перспективные автомобильные топлива и общая оценка обеспеченности ими

В. ДЖ. МАК-ЛИАН, П.К.Т. де БОЕР, Х. С. ХОМАН, ДЖ. ДЖ. ФА-ГЕЛЬСОН. Водород в качестве топлива для поршневых двигателей	249
Е. У. ШМИДТ. Азотоводородные соединения в качестве перспективного автомобильного топлива	267
Е. М. ДИКСОН, Е. Е. ХЬЮС. Влияние применения жидкого синтетического топлива на автомобильный рынок	285
Список литературы	308

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ
АВТОМОБИЛЬНЫЕ ТОПЛИВА**

Переплет художника *Н. Н. Аникушина*

Технический редактор *Т. А. Захарова*

Корректор вычитчик *С. Н. Пафимова*

Корректор *С. М. Лобова*

ИБ № 1928

Сдано в набор 12.10.81 Подписано в печать 17.08.82 Формат 60×90¹/₁₆ Бумага тип № 2
Гарнитура литературная Офсетная печать Усл. печ. л. 20 Усл. кр. отт. 20,51, Уч. изд.
л. 24,38 Тираж 12000 экз. Заказ 5787 Цена 1 р. 90 к.

Изд. № 2-4 1/14 № 0675.

Издательство «ТРАНСПОРТ», 107174, Москва, Басманный туп., 6а

г. Куйбышев, проспект Карла Маркса, 201
Ордена Грудного Красного Знамени типография изд. ва «Волжская коммуна»