

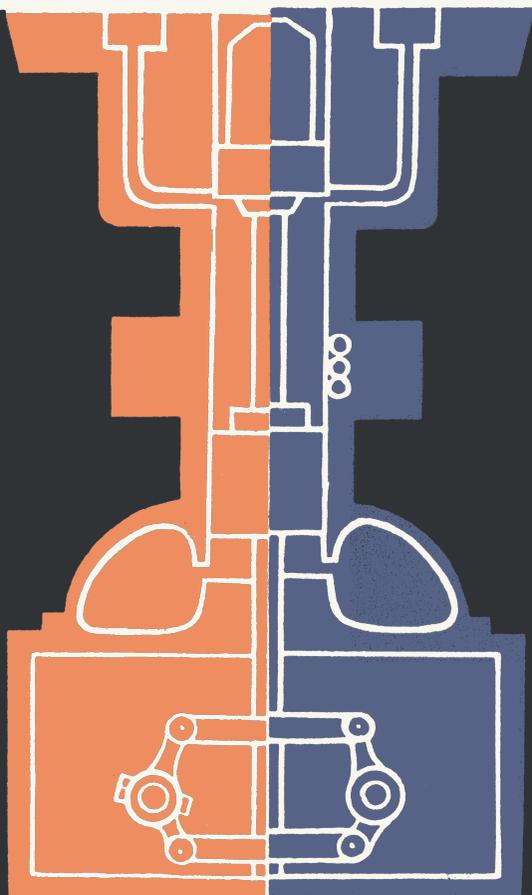
СЕРИЯ XX 1967



ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Г.В. СМІРНОВ

двигатели внешнего сгорания



Г. В. СМИРНОВ

Двигатели внешнего сгорания

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1967

Возрождение из пыли

Одной из технических сенсаций 1852 года было судно «Эриксон», строящееся на одной из верфей Нью-Йорка. Оно привлекло к себе общее внимание тем, что его владелец и строитель Джон Эриксон (1803—1889)—шведский инженер, работавший сначала в Англии, а потом в Америке,—решил отказаться от паровой машины и заменить ее «калорическим двигателем» собственного изобретения, работавшим на горячем воздухе. В те времена, когда паровая машина была, по сути дела, единственным механическим двигателем и одерживала один успех за другим, намерение напористого шведа многим показалось чересчур смелым. И большинство специалистов сошлось на том, что судно не сдвинется с места.

Что касается самого Эриксона, то он, казалось, не испытывал особых волнений. Да это и не удивительно, он занимался своим двигателем около 20 лет, и ему было не впервой выслушивать мрачные пророчества специалистов. В 1833 году сам Фарадей в одной из своих публичных лекций выразил сомнение в работоспособности машин Эриксона. Великий физик брался даже теоретически доказать, почему она не может работать. Это заявление вызвало у изобретателя ироническую улыбку. Сразу же после лекции он пригласил ученого в свою мастерскую и продемонстрировал ему действующую модель, развивавшую мощность в 5 л. с. И Фарадей, великий Фарадей, имел мужество признаться в том, что он не в состоянии объяснить, как она работает. Впрочем, у Фарадея были основания сомневаться в работоспособности калорической машины. Ведь Эриксон заявлял тогда и едва ли не до конца своей жизни был убежден в том, что он изобрел вечный двигатель. И хотя в 1833 году закон сохранения энергии еще не был окончательно сформулирован, проницательный Фарадей интуитивно не допускал существования вечного двигателя.

Машина же Эриксона до открытия закона сохранения энергии хоть кого могла завести в тупик. В ней отработавший горячий воздух перед тем, как быть выброшенным в атмосферу, проходил через регенератор — плотную металлическую проволочную ткань — и отдавал ему все тепло. Сжатый же холодный воздух, пропускаемый через регенератор, получал это тепло обратно перед тем, как попасть в рабочий цилиндр (рис. 1).

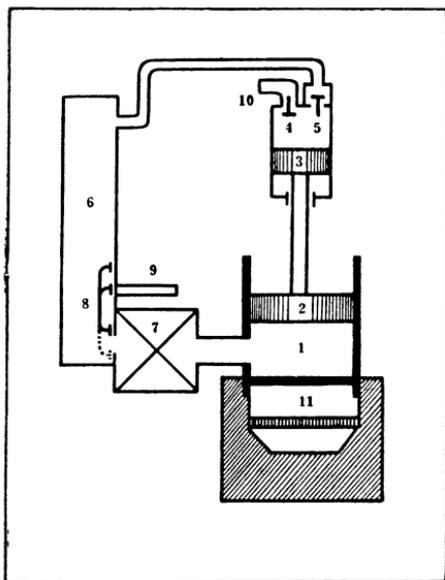


Рис. 1. Схема двигателя Эриксона: 1 — рабочий цилиндр; 2 — поршень; 3 — компрессор; 4 — всасывающий клапан; 5 — нагнетательный клапан; 6 — промежуточный резервуар; 7 — регенератор; 8 — переключательный золотник; 9 — выхлопная труба; 10 — всасывающая труба; 11 — топка

ханический эквивалент теплоты), создавалось впечатление, что нагревание рабочего цилиндра нужно лишь для пополнения неизбежных потерь тепла на лучеиспускание нагретых частей двигателя, на несовершенство работы регенератора, трение и т. д.

Эриксон предполагал, что если построить очень крупные калорические машины, в них удастся снизить эти потери и получить опромную экономию в топливе. Несколько более мощных моделей и успех одной из них на Всемирной выставке в Лондоне в 1851 году как будто подтверждали правильность этой идеи. Поэтому-то он не очень волновался перед началом испытаний своего судна.

Результаты испытаний оказались обескураживающими не только для скептиков, но и для самого Эриксона. Вопреки пророчествам первых, судно «сдвинулось с места» и даже пересекло Атлантический океан. Но вопреки ожиданиям изо-

чал это тепло обратно перед тем, как попасть в рабочий цилиндр (рис. 1).

Воздух через всасывающую трубу 10 и клапан 4 попадает в компрессор 3, сжимается и через клапан 5 выходит в промежуточный резервуар 6. В это время золотник 8 перекрывает выхлопную трубу 9 и воздух через регенератор попадает в рабочий цилиндр 1, нагреваемый топкой 11. Здесь воздух расширяется, совершая полезную работу, которая частично запасается в тяжелом поднимаемом поршне, частично идет на сжатие холодного воздуха в компрессоре 3. Остальное — полезная работа. Опускаясь, поршень выталкивает отработавший воздух через регенератор 7 и золотник 8 в выхлопную трубу. При опускании поршня в компрессор засасывается свежая порция воздуха.

Поскольку точных измерений тогда никто произвести не мог (ведь еще не был даже известен механический эквивалент теплоты), создавалось впечатление,

что нагревание рабочего цилиндра нужно лишь для пополнения неизбежных потерь тепла на лучеиспускание нагретых частей двигателя, на несовершенство работы регенератора, трение и т. д.

Эриксон предполагал, что если построить очень крупные калорические машины, в них удастся снизить эти потери и получить опромную экономию в топливе. Несколько более мощных моделей и успех одной из них на Всемирной выставке в Лондоне в 1851 году как будто подтверждали правильность этой идеи. Поэтому-то он не очень волновался перед началом испытаний своего судна.

Результаты испытаний оказались обескураживающими не только для скептиков, но и для самого Эриксона. Вопреки пророчествам первых, судно «сдвинулось с места» и даже пересекло Атлантический океан. Но вопреки ожиданиям изо-

бретателя, четыре гигантских по размерам двигателя (диаметр цилиндров — 4,2 м, а рабочий ход — 1,8 м) вместо 1000 л. с. развили всего 300. Расход угля получился такой же, как и у паровых машин. Кроме всего этого, к концу рейса нагреваемые днища рабочих цилиндров прогорели насквозь, и в Англии машины пришлось снять и тайком заменить их обычной паровой. В довершение ко всем несчастьям на обратном пути в Америку судно потерпело аварию и погибло со всем экипажем.

Отказавшись от мысли строить «калорические машины» большой мощности, Эриксон наладил массовый выпуск небольших двигателей. В те времена не было еще электростанций и двигателей внутреннего сгорания, поэтому неприхотливые безопасные движки Эриксона оказались очень практичными. К 1887 году в одной только Америке 6 тысяч таких машин отлично работало в типографиях, в доках, в шахтах, на мелких судах. Они накачивали воду в водонапорные баки частных домов, приводили в движение лифты. Сам Эриксон очень гордился успехом своего любимого изобретения и в старости разработал еще одну модификацию: калорическую машину, действующую от солнечных лучей. По его мнению, такие машины, расположенные по берегам Нила, смогли бы обеспечить энергией многочисленные заводы и фабрики, производить орошение земель и т. д.

Конечно, у двигателей Эриксона было немало и недостатков, в том числе и чисто конструктивных. В них, например, тепло от уходящего воздуха не полностью отбиралось в регенераторе. Был велик расход смазочных материалов, рычаги и клапаны сильно стучали. Европейские конструкторы и фирмы, от внимания которых не ускользнул успех эриксоновских машин в Америке, стали разрабатывать свои собственные конструкции. К 1890-м годам на многих промышленных предприятиях Европы работали двигатели внешнего сгорания, в частности, такие двигатели были установлены и на петербургском заводе Нобеля. Многие заводы к этому времени выпускали усовершенствованные модели двигателя Эриксона — двигатели Лемана, Ридера. Маломощные движки в больших количествах изготовлялись и в России под названием «Тепло и сила».

Отсюда видно, что двигатели, работающие на горячем воздухе, были достаточно хорошо известны теплотехникам и механикам уже 70—80 лет назад. И мнение специалистов, считавших, что эти двигатели бесперспективные, трудно назвать необоснованным. В 10-томном издании «Промышленность и техника», выпущенном в 1902 году, об этих машинах говорилось: «Преимущество двигателей с нагретым воздухом для мелкой промышленности лежит в их безопасности, так как они везде могут быть устанавливаемы без разрешения поли-

ции, они не требуют особого котла и легко могут быть пускаемы в ход по непродолжительном предварительном их нагревании. Недостатки двигателей подобного рода заключаются в большом расходе топлива, в несколько сложной конструкции, а также в сравнительно больших размерах, обуславливающих большую ценность двигателя при сравнительно малой его мощности».

Надо сказать, что профессора А. Грунмах и Е. Розебом, писавшие статью о двигателях с нагретым воздухом 64 года назад, воспользовались довольно мягкими выражениями для оценки характеристик этой машины. Ведь речь идет о двигателе с к.п.д. 5%, мощностью в 2 л. с., весящем 4 т и занимающем объем в 21 м³! Тем не менее эта мягкость выражений не помешала им сделать как будто пророческие выводы:

«Так как современные газовые и керосиновые двигатели обладают теми же преимуществами, что и двигатели с нагретым воздухом, к тому же они не требуют топки, которую следует разводить и поддерживать, а следовательно, они удобнее в работе, то в новейшее время они все более и более вытесняют двигатели с нагретым воздухом, и, по-видимому, в скором времени этот вид калорических двигателей совершенно исчезнет в технике и промышленности».

И верно, двигатели с нагретым воздухом исчезли с горизонта техники почти на 50 лет. Но когда они снова появились в поле зрения, их трудно было узнать. Оказалось, что даже первые, несовершенные образцы возрожденного двигателя внешнего сгорания (так его теперь называют) побили по экономичности и газовую турбину, и бензиновый мотор, и дизель. Больше того, выяснилось, что в этой тепловой машине заинтересованы все три ведущие отрасли современной техники: космическая, атомная и электронная. И как ни парадоксально, именно нужды радиоэлектроники заставили вспомнить о старинном и, казалось бы, бесперспективном двигателе.

В 1938 году эксперты голландской радиофирмы «Филипс», изучая запросы рынка, пришли к заключению: маломощные автономные двигатели для привода генераторов позволят сбывать продукцию фирмы в тех районах земного шара, где нет электроэнергии. Ведь возить в такие места сухие батареи накладно, а аккумуляторы заряжать негде. Паровая машина для привода электрогенератора слишком громоздка, а двигатели внутреннего сгорания требуют дорогого и не везде имеющегося жидкого топлива. Нужен был двигатель, совмещающий в себе экономичность дизеля, легкость бензинового мотора, неприхотливость к топливу и надежность паровой машины.

Поиски идей, произведенные в патентных и технических библиотеках, дали любопытные результаты. Оказалось, что

у Эриксона был предшественник — Роберт Стирлинг. Английское патентное ведомство выдало этому скромному шотландскому священнику, который, впрочем, был еще ученым и изобретателем, три патента на двигатели внешнего сгорания — в 1816, 1827 и 1840 годах. Как и Эриксон, Стирлинг не ограничился одними умозрениями. Несколько его машин были построены, и лучшая из них, в 45 л. с., три года проработала на шахте в Дунди. В конструкциях обоих изобретателей было много общего. И в той, и в другой машине рабочим телом был воздух, и в той, и в другой сердцем двигателя был регенератор. И та, и другая не очень-то блистали экономичностью. Зато неполадок с двигателем Стирлинга случалось почему-то больше, и он был менее надежным, чем двигатель Эриксона. Быть может, именно поэтому просмотрели одну очень важную деталь: при равных мощностях двигатель Стирлинга получался компактнее, чем двигатель Эриксона...

Казалось, весь предшествующий опыт говорил за то, что двигатели внешнего сгорания мало подходят для решения проблемы, где требуется высокая экономичность, надежность, легкость.

Однако расчеты дали поразительные результаты: теоретически к. п. д. двигателей внешнего сгорания может достигать 70%. Это значит, что неудачи предшественников объяснялись второстепенными, в принципе, устранимыми факторами. Инженеры установили также, что более компактный стирлинг (будем называть его так по аналогии с дизелем) мало уступает эриксону по другим характеристикам, и именно эта конструкция и была принята за основную.

Война замедлила, но не прервала работы голландцев. Тайком от немцев они продолжали свои исследования и в 1944 году заработал первый, еще несовершенный, образец. Спустя несколько лет, новая модель показала к. п. д. 39%. Конечно, 39 — это не 70, но даже эта опытная модель оказалась экономичней газовой турбины с к. п. д. 26%, авиационного бензинового мотора с к. п. д. 28—30% и лучших дизелей с к. п. д. 32—35%. Больше того, экономичность далеко не единственное достоинство стирлинга. Его нетрудно приспособить для работы с любым источником тепла: солнечными лучами, атомным реактором, дровами, соломой, углем, керосином и даже солевым расплавом или подземной горячей лавой. Правда, стирлинг несколько тяжелее своих соперников. Вес на 1 л. с. у него — 5 кг, а у дизеля и бензинового мотора 4,7 и 1,3 кг. Но зато стирлинг абсолютно бесшумен.

Когда узнаешь о какой-нибудь старой технической идее, возродившейся на новом уровне, поневоле спрашиваешь себя: «Что же препятствовало ее осуществлению раньше? В чем состояла та проблема, та «зацепка», без решения которой она не могла проложить себе дорогу в жизнь?».

И почти всегда оказывается: своим возрождением старая идея обязана либо новому технологическому процессу, либо новому материалу, либо новой конструкции, до которой не додумались предшественники.

Двигатель внешнего сгорания в этом отношении любопытное исключение. Конечно, повышение общего уровня сказалось на совершенстве возрожденной конструкции. Но главная причина успеха — это правильный выбор основных параметров и областей применения двигателя, скрупулезное исследование работы каждого узла и тщательная доводка каждой детали. Вот и все, что позволило не только реализовать преимущества теоретического цикла, но и создать исключительную в своем роде конструкцию.

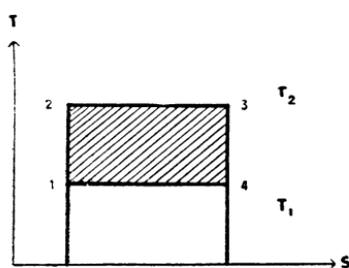
От «гадкого утенка» до прекрасного лебедя

Принцип действия многих тепловых двигателей состоит в том, что при расширении нагретого газа совершается бóльшая механическая работа, чем при сжатии холодного газа. Бутылка, кастрюли с горячей и с холодной водой — вот все, что нужно для простейшего теплового двигателя. Сначала опустите бутылку в ледяную воду, а когда воздух в ней охладится, заткните горлышко пробкой и быстро перенесите в горячую воду. Через несколько секунд раздастся хлопок: нагрываемый в бутылке газ расширяется и выталкивает пробку, совершая механическую работу. Теперь бутылку можно снова вернуть в ледяную воду и повторить цикл.

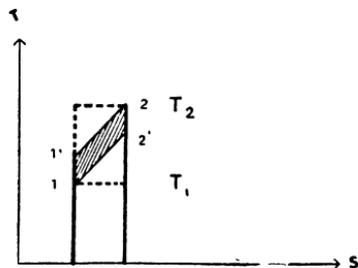
Итак, сжатие, нагрев, расширение, охлаждение — вот четыре основных процесса, необходимых для работы теплового двигателя. Каждый из них можно проводить разными путями. Скажем, охлаждение и нагрев газа могут протекать в замкнутой полости при постоянном объеме (изохорный процесс) или под движущимся поршнем при постоянном давлении (изобарный процесс). Сжатие или расширение газа может происходить при постоянной температуре (изотермический процесс) или без теплообмена с окружающей средой (адиабатический процесс). Составляя замкнутые циклы из различных комбинаций этих процессов, нетрудно получить теоретические циклы, по которым работают все современные тепловые двигатели. Скажем, комбинация из двух адиабат и двух изохор образует теоретический цикл бензинового мотора. Если заменить в нем изохору, по которой идет нагревание газа, изобарой, получится цикл Дизеля. Две адиабаты и две изобары дадут теоретический цикл газовой турбины.

Для сравнения удобнее всего воспользоваться диаграммами $T-S$, то есть диаграммами, в которых оси координат — температура и энтропия (рис. 2). В этих диаграммах площадь, находящаяся под линией, изображающей тот или иной процесс, представляет собой количество тепла, подведенного или отведенного от рабочего тела во время протекания процесса.

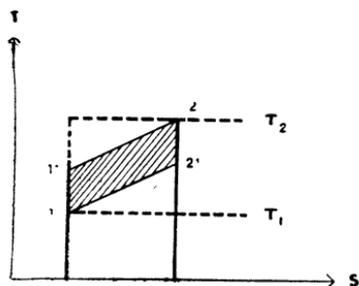
a — так выглядит на диаграмме $T-S$ цикл Карно, состоящий из двух адиабат ($1-2$, $3-4$) и двух изотерм ($2-3$, $4-1$). Заштрихованная



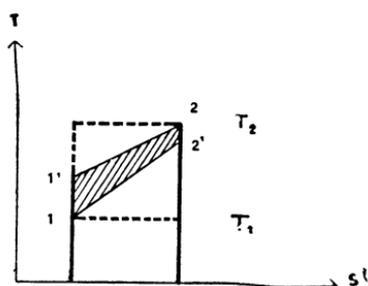
a



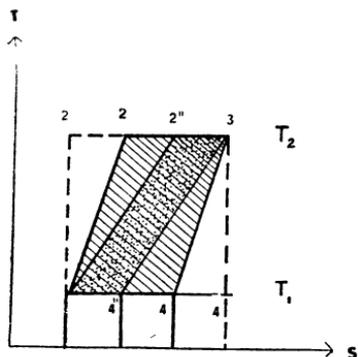
б



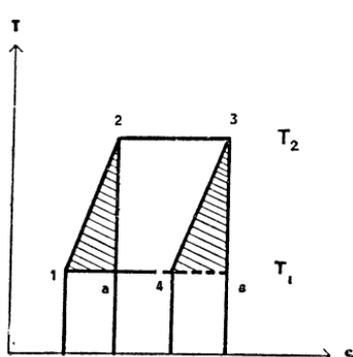
в



г



д



е

Рис. 2. Сравнение циклов тепловых двигателей.

площадь — полезная работа цикла. В данном интервале температур — T_1-T_2 цикл Карно имеет максимальный к. п. д.;

δ — цикл бензинового мотора, состоящий из двух адиабат ($1-1'$,

2—2') и двух изохор (1'—2, 2'—1) в том же интервале температур $T_1—T_2$. Заштрихованная площадь — полезная работа. Пунктиром показан соответствующий цикл Карно, из сравнения с которым видно, что полезная работа цикла бензинового мотора меньше, чем работа цикла Карно; *в* — цикл газовой турбины, состоящий из двух адиабат (1—1', 2—2') и двух изобар (1'—2, 2'—1) в том же интервале температур $T_1—T_2$. Сравнение заштрихованной площади — полезной работы цикла с работой соответствующего цикла Карно показывает, что и здесь она меньше, чем у цикла Карно;

г — цикл Дизеля, состоящий из двух адиабат (1—1', 2—2'), изобары (1'—2) и изохоры (2'—1), в интервале температур $T_1—T_2$. Поскольку изохоры на диаграмме $T—S$ идут круче, чем изобары, площадь полезной работы цикла Дизеля меньше, чем у цикла бензинового мотора, и в одном интервале температур он менее выгоден;

д — циклы Стирлинга и Эриксона в диаграмме $T—S$ в одном интервале рабочих температур $T_1—T_2$. Ясно видно, что без регенератора цикл Стирлинга, состоящий из двух изохор (1—2, 3—4) и двух изотерм (2—3, 4—1), имеет большую площадь полезной работы, чем цикл Эриксона, состоящий из двух изобар (1—2'', 3—4'') и двух изотерм (2''—3, 4''—1), и оба эти цикла хуже соответствующего цикла Карно (1—2—3—4);

е — регенеративный цикл Стирлинга. Регенератор позволяет как бы отсечь треугольник 1—2—*а* и точно вставить его на место 4—3—*в*. В результате такой подстановки регенеративный цикл Стирлинга становится эквивалентным циклу Карно (*а*—2—3—*в*). Точно такую же операцию можно проделать и с циклом Эриксона. Итак, регенератор сравнивает к. п. д. циклов Стирлинга и Эриксона и делает их эквивалентными самому эффективному циклу — циклу Карно.

Среди всех мыслимых циклов комбинация из двух адиабат и двух изотерм играет особо важную роль в термодинамике. По такому циклу — циклу Карно должен работать двигатель, имеющий самый высокий к. п. д. для данного интервала температур. Двигатели, работающие по другим циклам, гораздо менее экономичны, менее выгодны. И все-таки до сих пор никому еще не удалось построить двигатель, реализующий цикл Карно. Почему?

Думается, что исчерпывающим образом на этот вопрос ответил в 1824 году сам Сади Карно — блестящий офицер французской армии: «Нельзя надеяться хотя бы когда-либо практически использовать всю движущую силу топлива. Попытки, сделанные для приближения к этому результату, будут скорее вредными, чем полезными, если они заставят забыть другие важные обстоятельства. Экономия топлива — это лишь одно из условий, которые должны выполнять тепловые машины; при многих обстоятельствах оно второстепенно, оно часто должно уступать первенство надежности, прочности и долговечности машины, малому занимаемому месту, дешевизне ее установки и т. д.». Потому-то и не построен до сих пор двигатель Карно, что при сравнительно небольшой мощности, он должен иметь огромные размеры, прочность и вес.

Действительность властно вторгается в теоретические построения, и то, что на бумаге кажется сверхвыгодным, на практике уступает место гораздо менее эффективным реше-

ниям. Из теории известно, например, что чем сильнее нагрето рабочее тело, тем выше экономичность двигателя. Современные виды топлива при сгорании создают температуру около 2000°C . Расчет показывает, что двигатель Карно, работающий в интервале температур $0\text{—}2000^{\circ}\text{C}$, имел бы фантастический к. п. д. — 88%. Однако, если даже примириться с огромными размерами и весом, построить такой двигатель сейчас нельзя. Ведь пока нет материалов, способных сколько-нибудь длительное время работать при температуре 2000°C . Современные же материалы выдерживают лишь $700\text{—}800^{\circ}\text{C}$. Поэтому приходится сознательно недоиспользовать возможности топлива, искусственно понижать температуру, а следовательно, и экономичность. Взять хотя бы газовые турбины. Здесь ограничивающий фактор — стойкость турбинных лопаток, работающих в потоке раскаленных газов. Ведь они выдерживают лишь $700\text{—}800^{\circ}\text{C}$. Вот и приходится раскаленные до 2000°C газы, выходящие из камер сгорания, разбавлять избыточным количеством воздуха.

Так получается, что самыми экономичными тепловыми двигателями современной техники оказываются двигатели внутреннего сгорания, теоретически не блещущие особыми достоинствами. В них топливо, как и в газовых турбинах, сжигается непосредственно в рабочем теле, а сама периодичность работы цилиндров облегчает охлаждение поршней и цилиндров. Благодаря этому в двигателях внутреннего сгорания температура рабочего тела $1800\text{—}2300^{\circ}\text{C}$, что недоступно для других, теоретически более выгодных двигателей. Правда, здесь тоже не обходится без парадоксов. Например, при одинаковых степенях сжатия цикл бензинового мотора экономичнее, чем цикл дизеля. Но вся беда в том, что в цилиндрах бензиновых моторов сжимается горючая смесь, которая при высоких степенях сжатия самовоспламеняется. В цилиндрах же дизеля сжимается чистый воздух, в который потом впрыскивается топливо. Здесь нет опасности детонации, допустимы более высокие степени сжатия, и поэтому дизель оказывается самым экономичным тепловым двигателем в современной технике.

Какое же место занимают в ряду тепловых машин двигатели внешнего сгорания? Чем объясняются их неудачи в прошлом и успехи в настоящем?

На первый взгляд, трудно предположить, чтобы в них были заложены какие-нибудь возможности, позволяющие им тягаться с двигателями внутреннего сгорания по экономичности. Ведь сгорание топлива происходит вне рабочего цилиндра и тепло подводится к рабочему телу через стенку. Значит, наивысшая температура цикла ограничена $600\text{—}650^{\circ}\text{C}$. Трудно, казалось бы, ожидать и какого-либо выигрыша в размерах. Циклы, по которым работают стирлинги и

эриксоны, имеют много общего. Цикл Стирлинга состоит из двух изотерм и двух изохор, а цикл Эриксона — из двух изотерм и двух изобар. Достаточно построить диаграммы этих двигателей, чтобы убедиться, что при работе на атмосферном воздухе их размеры получаются огромными. Правда, сравнение диаграмм наглядно выявляет разницу между двигателями. При одинаковых перепадах температур эриксоны требуют меньших давлений, но зато объем рабочего цилиндра получается огромным. Стирлинги, наоборот, были компактнее, но зато требовали более высоких давлений. Это проливает некоторый свет на различие судеб двигателей в прошлом веке. Тогда техника высоких давлений была разработана слабо, поэтому сделать надежными компактные стирлинги было гораздо труднее, чем промаздки эриксоны.

Строго говоря, и стирлинги и эриксоны могут работать без регенераторов. Расчеты показывают, что при одинаковых верхней и нижней температурах цикла стирлинги получаются экономичнее. Это объясняется тем, что при нагреве газа по изохоре требуется тепла меньше, чем при нагреве по изобаре. Включение регенератора в цикл сообщает двигателям внешнего сгорания уникальные свойства. Прежде всего, стирлинги и эриксоны, работающие в одном интервале температур, при наличии регенератора имеют одинаковый к.п.д. Это нетрудно объяснить.

Чтобы нагреть воздух до данной температуры при постоянном давлении, нужно запасти в регенераторе больше тепла, чем для нагрева его при постоянном объеме. Но ведь охлаждение обработавшего расширившегося воздуха в регенераторе тоже происходит при постоянном давлении, значит, здесь запасается ровно столько тепла, сколько нужно для нагрева сжатого воздуха, идущего в рабочий цилиндр.

Но самое удивительное и самое важное не в том, что к.п.д. регенеративных стирлингов и эриксонов становятся равными. Главное в том, что они становятся равными к.п.д. цикла Карно! Это значит, что даже при 600—620°C теоретический к.п.д. двигателей внешнего сгорания составляет около 70%.

Но если это так, то почему же ни Стирлинг, ни Эриксон не смогли добиться того успеха, которого заслуживали их изобретения?

Прежде всего ни тот, ни другой не смогли полностью использовать достоинства изобретенных ими регенераторов. Ведь науки о теплопередаче тогда просто не существовало. Произвести расчет регенератора было невозможно, поэтому его размеры принимались «на глазок». А к.п.д. двигателя очень сильно зависит от качества работы регенератора. Наконец, ни Стирлинг, ни Эриксон не догадались сделать свои машины замкнутыми. В обеих конструкциях рабочим телом

был воздух, засасываемый в двигатель при атмосферном давлении, и это определило огромные размеры машин при сравнительно малой мощности.

Тем более удивительно, что в этих неблагоприятных условиях Роберт Стирлинг сумел найти такую удачную и остроумную конструкцию, что принципиальная схема и кинематика рабочей части его машины почти целиком перековывалась в современные модели. Инженеры лишь тщательно исследовали регенератор и довели его эффективность до 98%. Чтобы увеличить мощность и сделать двигатель компактным, они сделали рабочую часть изолированной от атмосферы и заполнили ее сжатым до 100 атмосфер газом — гелием или водородом. Это и позволило создать ту модель, которая произвела сенсацию среди теплотехников.

Стирлинг, как он есть

Рабочая часть современного стирлинга представляет собой замкнутый объем, заполненный рабочим газом (рис. 3). Верхняя часть объема — горячая, она непрерывно нагревается. Нижняя — холодная, она все время охлаждается водой. В этом объеме находится цилиндр с двумя поршнями:

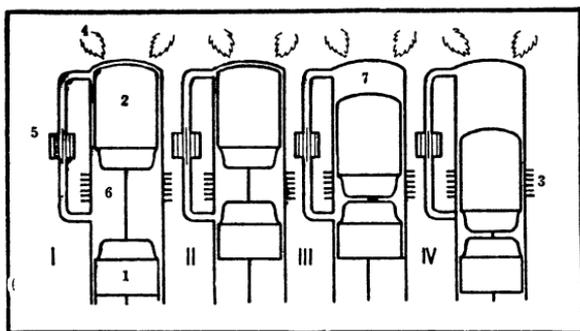


Рис. 3. Работа современного двигателя Стирлинга:

1 — рабочий поршень; 2 — поршень-вытеснитель; 3 — охлаждающий; 4 — нагреватель; 5 — регенератор; 6 — холодное пространство; 7 — горячее пространство.

поршнем-вытеснителем и рабочим поршнем. Когда рабочий поршень движется вверх, газ в объеме сжимается, при движении поршня вниз — расширяется. Движением же вверх — вниз поршня-вытеснителя производится попеременное нагревание и охлаждение газа. Когда поршень-вытеснитель находится в верхнем положении в горячем пространстве, большая часть газа оказывается вытесненной в холодное про-

странство. В это время рабочий поршень начинает двигаться вверх и сжимает холодный газ. Теперь поршень-вытеснитель устремляется вниз до соприкосновения с рабочим поршнем, и сжатый холодный газ перекачивается в горячее пространство. Расширение нагреваемого газа — рабочий ход. Часть энергии рабочего хода запасается на последующее сжатие холодного газа, а избыток идет на вал двигателя.

Но мы ничего не сказали о регенераторе. Этот аппарат находится между холодным и горячим пространствами. Когда расширившийся горячий газ движением поршня-вытеснителя перекачивается в холодную часть, он проходит через плотный пучок тонких медных проволочек и отдает им все содержащееся в нем тепло. Во время обратного хода сжатый холодный воздух, прежде чем попасть в горячую часть, отбирает это тепло обратно.

Конечно, в реальной машине все выглядит не так просто, как в этом описании (рис. 4). Невозможно быстро на-

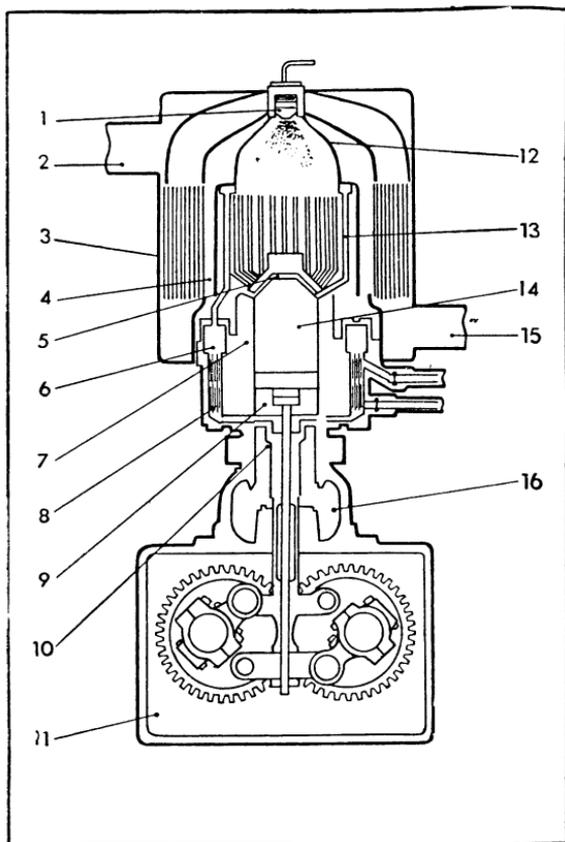


Рис. 4. Основные части и устройство современного стирлинга:

- 1 — топливная форсунка;
- 2 — выхлоп охлажденных газов;
- 3 — воздухоподогреватель;
- 4 — выход горячих газов;
- 5 — горячее пространство;
- 6 — регенератор;
- 7 — цилиндр;
- 8 — трубки охладителя;
- 9 — холодное пространство;
- 10 — рабочий поршень;
- 11 — ромбический привод;
- 12 — камера сгорания;
- 13 — трубки нагревателя;
- 14 — поршень-вытеснитель;
- 15 — впуск воздуха для сжигания топлива;
- 16 — буферная полость.

греть газ через заглушенную стенку цилиндра, нужна для этого гораздо бóльшая поверхность нагрева. Вот почему верхняя часть замкнутого объема превращается в систему тонких трубок, нагреваемых пламенем форсунки. Чтобы как можно полнее использовать теплоту продуктов сгорания, холодный воздух, подводящийся к форсунке, предварительно подогревается выхлопными газами — так появляется довольно сложный контур сгорания.

Холодная часть рабочего объема — тоже система трубок, через которую прокачивается охлаждающая вода.

Под рабочим поршнем — замкнутая буферная полость, наполненная сжатым газом. Во время рабочего хода давление в этой полости повышается. Запасаемой при этом энергии достаточно для того, чтобы сжать холодный газ в рабочем объеме.

Движение поршня-вытеснителя должно на четверть оборота опережать движение рабочего поршня. Для этого сконструирован необычный ромбический привод, состоящий из двух противоположно вращающихся валов, сцепленных друг с другом двумя шестернями, четырех шатунов и двух крейцкопфов.

Несмотря на свой несколько легкомысленный вид, этот механизм обладает очень важными качествами. Он полностью устраняет боковые усилия на штоки обеих поршней. Без этого создать надежные уплотнения между штоками и предотвратить перетечки газа было необычайно трудно. Из рабочей части в картер выходит только один прямолинейно движущийся шток рабочего поршня, внутри которого проходит шток поршня-вытеснителя. Поскольку надежно уплотнить шток рабочего поршня не составляет особой проблемы, в картере можно не создавать высокого давления. Но наиболее важное достоинство ромбического привода то, что все инерциальные силы могут быть полностью уравновешены с помощью противовесов, движущихся противоположно цапфам кривошипов. Именно благодаря этому удалось создать идеально сбалансированный, не вибрирующий одноцилиндровый стирлинг.

Поскольку давление в цилиндре хотя и повышается со 100 до 200 атмосфер, но повышается плавно, а не взрывом, как в двигателях внутреннего сгорания, вибрации двигателя практически отсутствуют. Говорят, положив руку на работающий стирлинг, трудно догадаться, действует он или нет. У стирлингов нет карбюраторов, систем зажигания, клапанов, свечей. Им не нужны глушители, ведь они работают совершенно бесшумно. Качественное сгорание топлива в форсунке полностью снимает проблему задымления городов.

Какие же результаты достигнуты в этой области на се-

годняшний день? Одна из опытных моделей фирмы «Дженерал моторс», работающая всего на 16 см³ сжатого до 100 атмосфер водорода, развивает мощность в 40 л. с. Сейчас цилиндровая мощность доведена до 100 л. с., а в недалеком будущем эту цифру собираются увеличить до 400 л. с. С точки зрения регулирования мощности, стирлинги не оставляют желать ничего лучшего. Чтобы сбавить мощность, достаточно выпустить из замкнутого рабочего объема в стальной баллон часть водорода. Автоматика немедленно уменьшает подачу топлива так, чтобы температура оставалась постоянной. Для увеличения мощности газ нагнетается из баллона обратно в рабочий объем.

Слегка видоизменив нагреватель, стирлинг можно приспособить не только для работы на жидком, но и на любом другом виде топлива — твердом или газообразном. Он даже может работать совсем без топлива. Ведь нагревать верхнюю часть рабочего объема можно от любого нагретого тела: от ядерного реактора, от солнечных лучей, от расплава каких-нибудь веществ. Маленькая моделька работает даже от тепла рук. Если же нагревательную головку стирлинга заполнить расплавом вещества, обладающего большой теплотой плавления, стирлинг без всякой дозаправки может работать несколько часов. Подсчитано, например, что 7 л расплава окиси алюминия эквивалентны 1 л бензина, а ведра расплавленного фтористого лития хватает для работы трехсильного стирлинга в течение 5 часов. Экономичность, надежность, бесшумность, отсутствие вибраций, способность работать на любом источнике тепла — не правда ли, этого блестящего набора достоинств вполне достаточно, чтобы компенсировать самый существенный недостаток стирлингов по сравнению с двигателями внутреннего сгорания — их относительно большой вес?

Конечно, он в десятки, в сотни раз меньше, чем у двигателей внешнего сгорания, построенных в прошлом столетии. Применение сжатого водорода или гелия в качестве рабочего тела позволило настолько снизить размеры и интенсифицировать теплообмен в нагревателе, что двигатели стали на редкость компактными. Правда, замкнув цикл, инженеры вынуждены были позаботиться о том, чтобы искусственно охлаждать рабочее тело. Так появился охладитель, которого не было у первых двигателей внешнего сгорания. Ведь там порции холодного воздуха забирались прямо из атмосферы. Наличие нагревателя и охладителя, как бы компактны они ни были, утяжеляет двигатель внешнего сгорания по сравнению с двигателями внутреннего сгорания, но зато сообщает им одно очень важное качество.

Изолированные от внешней среды, они практически не зависят от нее. Стирлинг может работать от какого-либо ис-

точника тепла всюду: под водой, под землей, в космосе, то есть там, где двигатели внутреннего сгорания, нуждающиеся в воздухе, работать не могут. В таких условиях без нагревателей и охладителей, в которых тепло передается через стенку, в принципе нельзя обойтись. И тогда-то стирлинги побивают своих соперников даже по весу.

Космические обязанности стирлинга *

В свое время Джон Эриксон не случайно выбрал берега Нила, как наиболее вероятное место для установки разработанных им калорических двигателей, работающих от солнечных лучей. Ведь именно здесь и солнца много, и вода рядом, и потребители налицо. Но действительность внесла свои поправки в прогнозы шведского изобретателя. Оказалось, что в современной технике есть область применения для солнечных стирлингов и эриксонов гораздо более перспективная, чем берега Нила. Эта область — космос...

Не ослабляемые воздушной атмосферой солнечные лучи несут запас энергии, достаточный для непрерывной работы аппаратуры. Нужен только надежный преобразователь этой энергии в электричество, способный работать на полной нагрузке непрерывно в течение нескольких лет. Выбору наиболее выгодного устройства, преобразующего солнечную энергию в электрическую, посвящено немало научных работ. Например, солнечные батареи, казалось бы, очень надежный и выгодный преобразователь. Однако к.п.д. лучших солнечных батарей всего лишь 15%. На первый взгляд может показаться, что к.п.д. не играет особо важной роли. Ведь батареи не расходуют дорогостоящего топлива, которое выгодно экономить. Они работают на солнечных лучах, а их в космосе сколько хочешь... Но нельзя забывать: к.п.д. определяет вес батарей, необходимых для того, чтобы выработать заданную мощность. И когда эта мощность достигает 3—5 квт, солнечные батареи становятся настолько тяжелыми, что инженеры волей-неволей вынуждены обратиться к обычным тепловым механическим двигателям. Впрочем, современная техника не очень-то богата установками, способными работать в безвоздушном пространстве.

Прежде всего такие установки должны быть предельно экономичными, ибо чем больше к.п.д., тем меньше вес спутника, тем меньше и дешевле получается ракета, выводящая его на орбиту. Двигатель должен обладать феноменальной надежностью. Без повреждений перенеся перегрузки и вибрации запуска, он должен вовремя включиться и без суще-

* В последних 3-х разделах брошюры использованы материалы из зарубежных источников.

ственных отклонений от расчетного режима проработать в условиях вакуума и невесомости по меньшей мере в течение года. Он должен быть идеально сбалансирован и не должен вибрировать: ведь он стоит на невесомом спутнике, который будет чутко реагировать ответными движениями на малейший толчок или вибрацию двигателя.

Вот какие результаты дает сравнение ртутной турбины и стирлинга мощностью 3—5 квт для искусственного спутника: спутник со стирлингом в целом получился на 42% легче — 258 вместо 365,5 кг. И это несмотря на то, что рабочий объем вместо более выгодного с точки зрения экономичности водорода был наполнен гелием. От водорода здесь пришлось отказаться, ибо этот газ легко диффундирует через большинство металлов. В земных условиях это не страшно: запас водорода в рабочем объеме нетрудно пополнить. В космосе этого сделать нельзя, и, если бы стирлинг был заполнен водородом, его мощность со временем непрерывно уменьшалась бы из-за утечки рабочего тела. Гелий не обладает таким недостатком, и это компенсирует некоторое снижение экономичности.

Как же устроен спутник с солнечным стирлингом? Система ориентации удерживает спутник в таком положении, чтобы его раскрытое шестиметровое зеркало все время было направлено к Солнцу. Сфокусированные лучи падают на трубки абсорбера, нагревая до 675°C прокачиваемый через него жидкий сплав NaK.

Нагретый сплав отдает свое тепло гелию, находящемуся в нагревателе стирлинга, и охлажденный снова направляется в абсорбер. Вот и вся разница между земным и космическим стирлингом, ибо охлаждение нижней части рабочего объема так же, как и на Земле производится водой.

Да, но где же охлаждается потом эта вода? Куда она отдает свое тепло? Здесь мы сталкиваемся с самой острой проблемой, которую космос ставит перед тепловыми двигателями — с проблемой отвода тепла. На Земле охлаждение не представляет особых трудностей. Мы можем обдувать охлаждаемую поверхность воздухом, прокачивать через нее холодную воду и т. д. В космосе это невозможно. Здесь единственный механизм отвода тепла — излучение. А чем ниже температура поверхности, тем меньше тепла она излучает и тем медленнее охлаждается. Вот почему для охлаждения воды с температурой 66°C, которая прокачивается через стирлинг мощностью 5 квт, нужен радиатор площадью в 15 м².

Ртутная турбина, почти по всем остальным показателям уступающая стирлингу, в отношении размера и веса регенератора как будто оказывается выгоднее. Для нее нужен радиатор площадью всего в 9 м². Но здесь нет никакой за-

гадки: наилучший режим работы ртутной турбины достигается тогда, когда температура в конденсаторе 260—320°C. Это значит, что радиатор ртутной турбины просто в 4 раза горячее, чем радиатор стирлинга, излучает с единицы поверхности больше тепла и потому может быть сделан меньших размеров.

Чтобы более наглядно представить себе результаты сравнения этих двух установок, достаточно взглянуть на таблицу, в которую сведены результаты расчета стирлинга и ртутной турбины мощностью в 5 квт:

	Стирлинг	Ртутная турбина
К. п. д. двигателя, %	37,5	13
Температура NaK на входе, °C	675	675
Температура радиатора, °C	66	260
Площадь поверхности радиатора, м ²	15	9
Площадь поверхности зеркала, м ²	26	76
Диаметр зеркала, м	5,8	9,9
Вес компонентов системы, кг:		
зеркало	51	141
абсорбер	9	24
резервуар	20,5	56
радиатор	16,5	11,5
система преобразования энергии	108	57
каркас	34	52
жидкость	19	25
Общий вес, кг	258	366,5

Был произведен и другой расчет: сравнили стирлинг и ртутную турбину при одинаковой площади радиаторов 9 м². Оказалось, что в этом случае температура радиатора у стирлинга повышается до 132°C, а общий вес установки, хотя и увеличивается, но все равно остается меньше, чем у ртутной, на 23%. Выходит, даже при площади радиатора в 15 м² установка со стирлингом оказывается на 108 кг легче ртутной турбины и на 84 кг легче солнечных батарей на ту же мощность.

У космического стирлинга есть еще некоторые любопытные особенности. Известно, что двигатели, работающие с постоянной нагрузкой без остановок, изнашиваются меньше, чем те, которые часто включаются и выключаются, или работают в широком диапазоне нагрузок.

И стирлинг — не исключение из общего правила. Было решено: двигатель на спутнике будет работать непрерывно

с постоянной мощностью. А как быть, если потребность в электроэнергии упала? Куда девать избыток мощности? Оказывается, этот избыток выгодно превращать в тепло и излучать его в космическое пространство. Но есть и еще одна трудность. Ведь спутник не все время освещен солнцем. При высоте орбиты 560 км из 100 минут, за которые он облетает Землю, только 65 минут приходится на освещенную сторону. Остальные 35 минут спутник находится в тени. Вот здесь-то и пригодилась способность стирлингов работать от любого источника тепла.

Когда спутник летит по освещенной стороне и солнечные лучи, собранные в пучок, непрерывно нагревают в абсорбере NaK, этот расплав прежде чем попасть в нагреватель двигателя, проходит через тепловой резервуар, наполненный гидридом лития. 16 кг этого вещества, будучи расплавленными, запасают в себе столько же энергии, сколько ее содержится в 500 кг электрических батарей. В результате 65-минутного полета по освещенной стороне весь гидрид лития оказывается расплавленным. Когда же спутник заходит в тень Земли, NaK, по-прежнему прокачиваемый через контур, не получая ничего в абсорбере, начинает отнимать у расплава гидрида лития запасенное тепло. Этого тепла хватает на бесперебойную работу двигателя во время полета в тени. Любые излишки тепла в системе через радиатор «сбрасываются» в окружающее пространство.

Было бы неправильно думать, что обычный, слегка модернизированный стирлинг можно поставить на спутник. Для того чтобы создать стирлинг в «космическом исполнении», пришлось провести немало исследований и конструкторских разработок. Прежде всего, как смазывать движущиеся части двигателя в условиях невесомости? Будет ли работать обычная система смазки под давлением, или ее надо заменить системой смазки масляным туманом, которая мало чувствительна к гравитационному полю? Как изолировать рабочее тело от смазки внутри двигателя? Ведь масло, попавшее в регенератор, резко снизит теплоотдачу, а следовательно, и к.п.д. Чтобы ответить на этот вопрос, пришлось детальнейшим образом исследовать работу всех уплотнений двигателя и даже предложить несколько экзотических решения, вроде уплотняющих колец из тефлона, пропитанного стеклом и графитом, которые могут работать без смазки. А какое выбрать рабочее тело для космического стирлинга? Как отбалансировать его кинематику? Как регулировать его работу?

Специалистам американской фирмы «Эллисон» пришлось немало поработать, чтобы ответить на все эти вопросы. И быть может, именно поэтому так веско звучит их заключение: «...двигатель Стирлинга выгодно использовать в тех

случаях, когда к.п.д. двигателя оказывает большое влияние на общий вес системы. Подобные характеристики имеют энергетические системы спутников, использующих солнечную энергию. По-видимому, двигатель Стирлинга является лучшим из известных энергетических источников малой производительности».

Осталось только заметить, что это написано в 1961 году, через 60 лет после того, как профессора А. Грунмах и Е. Розебом, писавшие о двигателях на нагретом воздухе в издании «Техника и промышленность», обрели их на вечное забвение.

Двигатель атомного сгорания

До сих пор речь велась о сравнительно небольших мало-мощных стирлингах. Естественно, возникает вопрос: «А нельзя ли повысить мощность? И если можно, то насколько? Ведь стоит довести ее до нескольких тысяч лошадиных сил, и уже можно всерьез говорить о том, что появился, наконец, двигатель, достойный ядерной энергетики. Действительно, из современных тепловых установок только две могут работать на ядерном горючем: паровая и газовая турбины.

Чтобы реактор получился компактным, через его активную зону надо прокачивать такое вещество, которое может быстро отводить большое количество тепла. А чтобы реактор получился еще и легким, давление в его герметическом корпусе должно быть небольшим. Ученые и инженеры установили, что лучше всего для охлаждения реактора подходят расплавы металлов: натрия, калия, лития, свинца, висмута. Но некоторые из этих металлов бурно реагируют с водой, а поскольку протечки всегда могут произойти, комбинация паровой турбины с жидкометаллическим реактором получается не только ненадежной, но и опасной. С газовой турбиной дело обстоит лучше. Но вот беда: газ плохо отводит тепло и, чтобы его нагреть, нужны большие поверхности. Поэтому, хотя сам реактор получается компактным, большие размеры нагревателя с лихвой возмещают этот выигрыш. Правда, можно отводить тепло от активной зоны реактора непосредственно водой или газом. Установка тогда получается проще. Однако, проходя через работающую активную зону, газ или вода с содержащимися в ней примесями становятся от облучения нейтронами радиоактивными. Это затрудняет обслуживание турбин и механизмов и требует биологической защиты не только реактора, но и всей установки в целом, значительно утяжеляя ее. Кроме того,

сам реактор из легкого и компактного превращается в мощное тяжеловесное сооружение: ведь его корпус должен теперь выдерживать высокое давление рабочего тела.

Если бы удалось увеличить мощность двигателей внешнего сгорания хотя бы до нескольких тысяч лошадиных сил, они могли бы буквально вдохнуть новую жизнь в ядерную энергетику и особенно в ядерные силовые установки для судов. Благодаря высокой экономичности и малому количеству рабочего тела, содержащегося в цилиндрах стирлинга, потоки передаваемого тепла получились бы гораздо меньшими, чем, скажем, в газовой турбине такой же мощности. А высокое давление рабочего тела существенно увеличило бы скорость теплопередачи. В результате нагревательная часть, в которой жидкий металл из активной зоны реактора отдает тепло рабочему телу, получилась бы сравнительно небольших размеров, и компактный жидкометаллический реактор оказался бы очень удачно состыкованным с компактным и экономичным стирлингом. Из всех перечисленных металлов выгоднее всего окажется, пожалуй, литий: он имеет хороший коэффициент теплоотдачи и не требует высоких давлений. При одной атмосфере он плавится при 179°C , а кипит при 1300°C . Кроме того, он очень легок, его удельный вес почти вдвое меньше, чем у воды. Правда, литий сильно поглощает тепловые нейтроны, и это большой недостаток. Впрочем, сильно поглощает нейтроны изотоп лития Li^6 , которого в природном металле около 7,5%. Если этот изотоп удалить, оставшийся изотоп Li^7 будет идеальным материалом для такой установки. Li^7 хорошо замедляет нейтроны, поэтому его расплав может служить одновременно и теплоносителем и замедлителем. Литий хорошо проводит электрический ток, что позволяет сделать установку абсолютно безопасной с точки зрения радиоактивного облучения. Жидкий литий можно благодаря его электропроводности прокачивать через активную зону с помощью абсолютно герметичных электромагнитных насосов, в которых движение расплаву сообщается не лопатками или поршнями, а электромагнитным полем. Хотя при облучении в активной зоне литий и становится радиоактивным, период полураспада составляет всего 0,85 сек. Поэтому реактор можно соединить непосредственно с двигателем, а защита первого контура получается легкой.

Для стирлинга мощностью в 2500 л. с. понадобится реактор с цилиндрической активной зоной в 51 см диаметром и 102 см по высоте. 1580 кг слегка обогащенного урана — вот начинка 280 стержней, заключенных в керамические или металлические оболочки. Все эти стержни укреплены в легко вынимаемой стальной «корзинке». По мере того, как уран в стержнях будет выгорать, уровень лития в реакторе можно

постепенно повышать, как бы подключая в работу все новые и новые участки стержней. Когда весь уран выгорел, «корзинка» извлекается и заменяется новой. Такая замена требует нескольких минут и может производиться даже в горячем состоянии. Корпус реактора — цилиндр высотой 150 см и диаметром 60 см. На верхней крышке — управляющие стержни. Весь первый контур помещен в стальную герметичную оболочку, заполненную инертным газом.

Ну, что же, реактор в самом деле получается компактным, но как будет выглядеть сам двигатель? По-видимому, для получения больших мощностей следует отказаться от схемы с поршнем-вытеснителем. Двигатель может иметь от 8 до 16 цилиндров, расположенных V-образно под углом 90° (см. рис. 5). Поршни кинематически связаны между собой, как показано на схеме. Нагреватель, регенератор и охладитель расположены в одном корпусе между цилиндрами. В одном цилиндре газ всегда нагрет, в другом — охлажден. Вытесняясь поршнем из холодного цилиндра, газ проходит по-

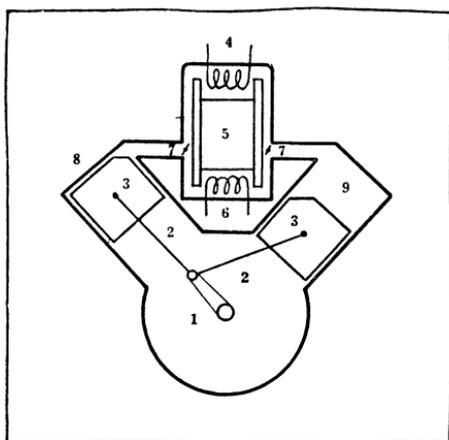


Рис. 5. Принципиальная схема V-образного стирлинга:

1 — кривошип; 2 — штифы; 3 — поршни; 4 — нагреватель; 5 — регенератор; 6 — охладитель; 7 — заслонки для изменения направления вращения; 8 — горячее пространство; 9 — холодное пространство.

следовательно через охладитель, регенератор, нагреватель и становится горячим, при движении в обратном направлении — холодным. При вращении кривошипа сначала движется вверх поршень в холодном цилиндре — газ сжимается. После этого начинает двигаться вниз поршень в горячем цилиндре, газ прокачивается через регенератор и нагреватель и становится горячим — это подвод тепла. Горячий газ расширяется, совершая работу — рабочий ход. Поршень в горячем цилиндре движется вверх, газ перекачивается через регенератор и охладитель, его температура понижается — это охлаждение. Такая схема удобнее для судового стирлинга, который, в отличие от космического, должен в случае необходимости ме-

нять направление вращения. Для этого в корпусе, где находятся нагреватель, регенератор и охладитель, достаточно перекинуть две заслонки, меняющие последовательность, в которой газ проходит эти аппараты. В результате горячий цилиндр становится холодным, холодный — горячим, а стирлинг начинает вращаться в обратную сторону. Для уменьшения мощности достаточно понизить давление газа в рабочем объеме двигателя, одновременно переместив регулирующие стержни реактора таким образом, чтобы температура рабочего тела осталась неизменной. Если в качестве рабочего тела принят водород, то нетрудно прикинуть, что при начальной температуре цикла 675°C и при конечной 90°C может быть достигнут к.п.д. в 60%. Если вспомнить, что лучшие судовые газовые турбины имеют к.п.д. 27%, паровые — 29%, а дизели — 41%, то становится ясным, сколь опасного соперника обрели судовые установки в атомном стирлинге. Правда, применение менее опасного гелия снижает к.п.д. стирлинга до 50%.

Любопытные возможности таит для теплотехников использование в качестве рабочего тела треххлористого алюминия. При охлаждении это вещество полимеризуется, а при нагревании снова диссоциирует, причем его удельная теплоемкость и теплопроводность резко возрастают. Следовательно, во время охлаждения треххлористого алюминия от него придется отводить дополнительное тепло, выделяющееся при полимеризации. И это быть может позволит существенно снизить размеры и улучшить эффективность регенератора.

Помимо высокой экономичности, надежности, бесшумности, стирлинги обладают еще одним качеством, важным именно для атомных судов: их очень быстро и легко можно перевести с ядерного горючего на обычное топливо. По соображениям безопасности желательно, чтобы судовые ядерные установки не работали при заходе кораблей в порты. В установках со стирлингом выполнить это требование ничего не стоит. За несколько миль до порта ядерный реактор выключается, а жидкий расплав в головку двигателя поступает из нагревателя, работающего на обычном мазуте.

Рассказ о двигателях внешнего сгорания будет неполным, если не упомянуть о своего рода «антистирлингах», двигателях, превращенных в холодильные машины...

Вы только отключили горелку...

Впрочем, превращение это не потребовало особых трудов, и здесь еще раз проявились удивительные особенности двигателей внешнего сгорания. Образно говоря, стирлинг

оказался одновременно и антистирлингом. Впервые это было обнаружено еще в 1834 году, когда было замечено: если вращать двигатель внешнего сгорания с помощью паровой машины и не разводить огонь под рабочим цилиндром, температура воздуха в нем понижается. На первый взгляд в этом нет ничего удивительного. В принципе у любого теплового двигателя есть свой «антипод» — холодильная машина, работающая по такому же циклу, но в противоположном направлении. Но вот что поразительно: если вы начнете вращать принудительно паровую машину, дизель или бензиновый мотор, вы никакого охлаждения не получите. Нужны специально сконструированные холодильные машины, чтобы реализовать обращенные циклы паровой машины, дизеля или бензинового мотора. Двигатель же внешнего сгорания каким-то фантастическим образом совмещает в «едином лице» и тепловую и холодильную машины. Замечено, что если у работающего стирлинга отключить горелку, то он продолжает еще некоторое время работать за счет тепла, запасенного в нагретой головке. По мере того, как температура ее приближается к температуре окружающей среды, вращение замедляется. Если же теперь «подхватить» это вращение, соединив стирлинг с электродвигателем, то головка начнет охлаждаться ниже температуры окружающей среды. И речь здесь идет не о 10—15°C.

В 1945 году инженеры фирмы «Филипс» раскрутили электромотором первую опытную модель двигателя внешнего сгорания мощностью в 1 л. с. и, к удивлению своему, охладили его головку до минус 190°C (83°K). Этот результат был тем более поразительным, что самую идею превратить двигатель внешнего сгорания в холодильную машину трудно назвать новой и не изученной. Наблюдение, сделанное в 1834 году, не осталось незамеченным, и с тех пор было сделано немало попыток приспособить эти двигатели для охлаждения. В 1873 году был, например, опубликован отчет об опыте 10-летней эксплуатации такой холодильной машины на пивоваренном заводе. Но увы, сто лет назад холодильным стирлингам и эриксонам повезло не больше, чем тепловым. Если последних dokonало появление двигателей внутреннего сгорания, то первые потерпели поражение от парокompрессионных холодильных установок, вроде тех, которые охлаждают продукты в ваших домашних холодильниках.

В 1945 году исследователей поразило другое, а именно, та легкость, с которой была достигнута столь низкая температура. Это наводило на мысль: предшественники потому отвергли идею холодильных стирлингов и эриксонов, что не сумели выяснить условий, в которых их достоинства проявляются наиболее ярко. Впрочем, это не их вина. Лаборатории низких температур появились в самом конце прошлого века,

и они долгое время были единственным местом, где были нужны сжиженные газы и низкотемпературные машины. До появления этих лабораторий такие машины просто не нашли бы сбыта. В 1950-х годах положение изменилось. Техника сверхнизких температур начала выходить из научных лабораторий в промышленность, требующую все больших и больших количеств сжиженных газов. И на этот раз достоинства холодильных стирлингов были оценены.

Первые расчеты показали, что основная причина прежних неудач — использование холодильных стирлингов и эриксонов для получения сравнительно высоких «низких температур» — минус 10—15°C. Зато для получения температур ниже минус 100°C, для сжижения воздуха, азота, водорода, гелия нет машины более выгодной, чем стирлинг. В 1954 году был построен первый сжижитель воздуха, работающий по циклу Стирлинга. Его испытания выявили основные достоинства и недостатки таких машин.

Прежде всего надежность. Отсутствие клапанов, простота движения поршней, протекание сложного холодильного процесса в одной полости делают машину простой в обслуживании и надежной. Увеличивая давление в рабочей полости, подбирая наиболее выгодное рабочее тело — гелий или водород, можно получить высокую производительность при небольших размерах машины. Но самое главное достоинство — это высокая экономичность. Правда, не при всех температурах. Стирлинги становятся эффективнее всех других низкотемпературных машин при температурах ниже минус 100°C.

Из графика (см. рис. 6) видно, что холодильные стирлинги имеют наиболее высокую эффективность при чрезвычайно низких температурах. Нижняя из двух кривых относится к малой экспериментальной модели, верхняя — к крупной промышленной. Максимальная же эффективность — 42%, достигается при 140°C. Это не значит, конечно, что с помощью стирлинга нельзя достигнуть еще большего понижения температуры. При минус 196°C его к.п.д. остается еще довольно высоким — 33%. Если же пойти на дальнейшее уменьшение к.п.д., можно получить еще более низкие температуры. Но пришлось немало помучиться, прежде чем удалось реализовать на практике теоретические возможности.

Холодильные машины по мере достижения все более низких температур становятся чувствительнее ко всякого рода потерям. Потери в холодильном стирлинге можно разбить на четыре категории. Механические потери возникают за счет трения между движущимися деталями машины. Потери гидравлические имеют своим источником трение между движущимся газом и частями машины. Потери на необратимый теплообмен вызываются тем, что охлаждение среды и отвод тепла после сжатия рабочего тела требует хотя бы неболь-

шого перепада температур, что снижает эффективность охлаждения. Наконец, четвертый источник потерь — это потери от несовершенства теплоизоляции. В стирлингах к этим потерям, свойственным всем холодильным машинам, добавляются потери в регенераторе. Это устройство, состоящее из

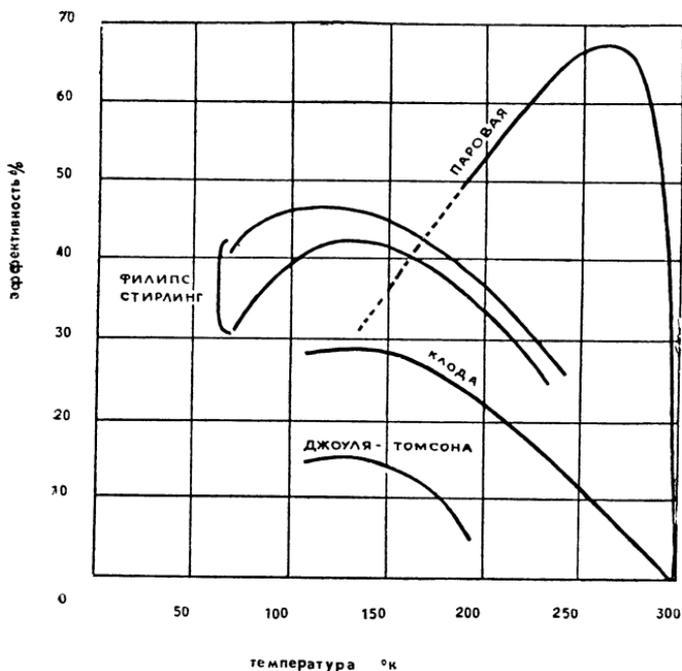


Рис. 6. Эффективность холодильных машин.

массы медных проволочек диаметром 0,2 мм, играет в холодильном стирлинге не менее важную роль, чем в тепловом: оно запасает тепло и возвращает его обратно рабочему телу при каждом рабочем такте. Этот обмен тепла не происходит со 100-процентной эффективностью. Тепло, не поглощенное регенератором, попадает в холодную полость, в которой газ оказывается нагретым больше, чем следует. Это, конечно, снижает эффективность холодильной машины и очень заметно. Например, в интервале температур от плюс 17° до минус 198°С 1% потерь в регенераторе снижает холодопроизводительность стирлинга на 20%. Эти 20% превращаются в 98%, когда стирлинг должен работать при температуре минус 253°С. Другими словами, при температуре сжижения водорода вся холодопроизводительность машины «съедается» в ре-

генераторе, не давая никакого полезного эффекта. Очень важно также, чтобы газ не просачивался из нагретого пространства в холодное, минуя регенератор: при протечке всего 1% газа между зазорами холодопроизводительность снижается на 20% при температуре минус 198°C. Ясно, что регенератор не зря называют сердцем холодильного стирлинга. Эффективность этого теплообменного аппарата, в котором газ охлаждается со скоростью 20000°C в секунду, должна быть не меньше 99%.

Учтя все эти обстоятельства, ученые создали модель, устойчиво и надежно работающую при температуре минус 196°C. Но иногда на ней удавалось достигать и минус 228°C. После пятилетних исследований тщательно изготовленные модели позволили температуре опуститься до минус 243°C. И, казалось, это был предел! Но после того, как на поршне-вытеснителе укрепили второй поршень-вытеснитель меньшего диаметра и поставили между второй регенератор и охладитель, удалось понизить температуру еще больше. В новой модели было получено двухступенчатое расширение: часть газа расширялась в кольцевой полости, а другая, пройдя через второй регенератор и охладитель, расширялась в верхней части. При этом первое расширение компенсирует потери в первом регенераторе и дает возможность оставшемуся газу охладиться еще больше. Именно на такой машине была достигнута рекордно низкая температура, всего на 12° выше абсолютного нуля!

Вот какие возможности таились в двигателях, которые 25 лет назад именовались в учебниках «устаревшими», «представляющими лишь академический интерес». Конечно, реализация этих возможностей дается не даром.

Холодильный стирлинг — сравнительно дорогая машина, так как требует тщательной обработки деталей и монтажа. Сама компактность машины препятствует передаче больших количеств тепла и снижает возможную холодопроизводительность. В сущности, ее выгодно использовать только как сжижитель газов. Если же применять ее для простого охлаждения газов или жидкостей, теплопередача уменьшается и возрастают потери. Даже сейчас расчет рабочего процесса очень затруднен, поскольку все теплообменные аппараты сгруппированы в одном корпусе. И, быть может, именно трудности теоретического анализа стали причиной того, что от внимания предшественников так долго ускользали достоинства этого удивительного цикла.

До последнего времени считалось, что холодильные стирлинги, несмотря на все свои достоинства, больше подходят для научных лабораторий, чем для промышленности, где необходимы машины большой производительности. Однако изобретенные недавно уплотнения, полностью устраняющие

перетечки нагретого газа в холодную полость, минуя регенератор, открывают, как кажется, холодильным стирлингам дорогу и в промышленность. И хотя достоинства этих машин достаются не малой ценой, все говорит за то, что у них большое будущее. Потребности современной радиоэлектроники в низких температурах нарастают лавинообразно. Сверхпроводящие машины, криотроны для вычислительных машин, мазеры, парамагнитные усилители, инфракрасные элементы, вакуумная техника — вот лишь некоторые потребители продукции холодильных стирлингов. И даже это далеко не полное перечисление не оставляет сомнений: холодильный стирлинг еще не сделал своей карьеры.

Двигатели, о которых СТОИТ ВСПОМНИТЬ

Скажем прямо, двигатели внешнего сгорания — это далеко еще не столбовая дорога в двигателестроении. Во всем мире едва ли наберется 4—5 фирм, которые имеют какой-нибудь опыт в постройке этих машин. Сейчас время поисков, время выявления достоинств, недостатков, областей применения. Строятся машины разных размеров и назначений на разные мощности и источники тепла.

Вот модель величиной с кирпич. Через 30 сек после того, как вспыхнул язычок пламени, она, работая на атмосферном воздухе, вращается с расчетной скоростью — 2000 об/мин. Мощности этого движка хватает на привод электрогенератора, питающего радиоприемник.

Как уже было сказано, существуют опытные модели, развивающие до 10, 40 и 100 л. с. Верхний предел мощности еще не выяснен, но, пожалуй, можно уверенно говорить по крайней мере о 3—5 тыс. л. с. А на экономичные, надежные, приспособленные к любому виду топлива двигатели, работающие в этом интервале мощностей, существует огромный спрос.

Прежде всего потребителем стирлингов может оказаться автомобилестроение. Не случайно крупнейший автомобильный концерн США «Дженерал Моторс» выставил на международной выставке в Нью-Йорке опытный образец стирлинга мощностью в 40 л. с. Не исключено, что стирлинги и эриксоны в недалеком будущем могут оказаться грозными конкурентами для двигателей внутреннего сгорания. Сейчас трудно поверить, что 60—70 лет назад бензиновому мотору пришлось в жестокой борьбе завоевывать то место, которое он занимает сейчас в автомобилестроении. И надо прямо сказать, что тогда его превосходство отнюдь не представлялось

столь очевидным, как в наши дни. Действительно, паровая машина — главный соперник двигателя внутреннего сгорания — обладала по сравнению с ним важными достоинствами: бесшумностью, простотой регулирования мощности, прекрасными тяговыми характеристиками и поразительной «всеядностью», позволяющей ей работать на любом виде топлива: от соломы до керосина. Тогда экономичность, легкость и надежность двигателей внутреннего сгорания взяли верх. И никто не обратил в свое время внимания на попытку Эриксона поставить свой двигатель на повозку. А ведь сама по себе его идея была неплоха. Правда, это стало ясно только сейчас, спустя почти 100 лет. Ведь в двигателе внешнего сгорания сочетаются достоинства и паровой машины, и бензиновых двигателей. Автомобиль со стирлингом может работать на любом топливе, а при необходимости и на расплаве. Подобная универсальность не только сможет выручить шофера, попавшего в беду. Она может оказаться лучшим решением проблемы, связанной с задымлением крупных городов выхлопными газами автомобилей. Скажем, не доезжая нескольких километров до порога, водитель включает горелку и расплавляет несколько килограммов окиси алюминия или гидрида лития. В черте города автомобили уже не жгут топлива: их двигатели работают на расплаве.

В свое время бензиновые моторы на автомобилях одержали верх над паровыми машинами еще и потому, что они легче заводились. А как обстоит дело со стирлингами в этом отношении? Оказывается, завести стирлинги проще, чем мотор. Достаточно сместить рабочий поршень в верхнюю мертвую точку и включить горелку.

Правда, несколько сложнее обстоит дело с системой охлаждения. Если в двигателях внутреннего сгорания значительная часть тепла отводится вместе с выбрасываемыми в атмосферу выхлопными газами, то в двигателях внешнего сгорания все это тепло должно отводиться в охлаждающую воду. Поэтому радиатор получается гораздо больше. Впрочем, эта особенность делает стирлинги особенно выгодными на морских и речных судах, где охлаждение радиатора можно производить забортной водой. Поскольку тепло от трубок передается воде лучше, чем воздуху, размеры радиатора на судне при прочих равных условиях получаются меньше, чем на автомобиле.

Способность стирлингов и эриксонов работать на расплавах особенно интересует инженеров, создающих транспорт для шахт и цехов со взрывоопасной атмосферой. Та же фирма «Дженерал моторс» изготовила недавно мотороллер, в бак которого заливается ведро расплавленного фтористого лития. Такой зарядки хватает для работы стирлингов в 3 л. с. в течение 5 часов.

Есть и еще одна перспективная область применения двигателей внешнего сгорания — транспортабельные электростанции малой мощности. Всего 30 кг весит переносная установка мощностью в 10 л. с. для американской армии. Этого вполне достаточно для питания походных радиостанций и другого электрооборудования. А какими удобными двигателями могут оказаться стирлинги и эриксоны для энергопоездов! Ведь использовать для выработки электроэнергии можно любое местное топливо: солому, дрова, уголь, мазут. А если энергопоезд отправляется на юг, в пустыню, в комплект его оборудования следует включить зеркальную систему для концентрирования солнечных лучей. Комбинация стирлинга или эриксона с атомным реактором — идеальная транспортабельная электростанция для работы в условиях Арктики и Крайнего Севера. А стирлинг, головка которого нагревается за счет подземного тепла, быть может, станет конкурентом паровых электростанций, работающих на подземном паре в районах высокой геотермальной активности.

Трудно даже охватить все области, где с успехом могут быть применены двигатели внешнего сгорания. Цель этой брошюры как раз в том и состоит, чтобы привлечь внимание инженеров самых различных специальностей к стирлингам и эриксонам. И не исключено, что именно эти удивительные машины и окажутся ключом к решению тех проблем, над которыми наши читатели ломают себе головы.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Возрождение из пыли	3
От «гадкого утенка» до прекрасного лебедя	8
Стирлинг как он есть	13
Космические обязанности стирлинга . . .	17
Двигатель атомного сгорания	21
Вы только отключили горелку	24
Двигатели, о которых стоит вспомнить . .	29

Герман Владимирович Смирнов

ДВИГАТЕЛИ ВНЕШНЕГО СГОРАНИЯ

Редактор *Н. А. Тютюнникова*
Худож. редактор *Е. Е. Соколов*
Техн. редактор *Е. М. Лопухова*
Художник *Ю. А. Архангельский*
Корректор *А. А. Пузакова*

А 12627. Сдано в набор 13/IX 1967 г. Подписано к печати 23/X 1967 г.
Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0.
Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,76. Тираж 19 200 экз. Издательство «Знание».
Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 3232. Типография изд-ва
«Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 6 коп.

ИДЕТ ПОДПИСКА НА 1968 ГОД!

Серия
научно-
популярных
брошюр

«ПРОМЫШЛЕННОСТЬ»

Индекс 70097

Рассказывает о достижениях важнейших отраслей народного хозяйства, о развитии и проблемах промышленности в целом.

В 1968 году подписчики получают в числе других следующие брошюры:

Арутюнов Н. Б., нач. Управления научно-техн. информации Государственного Комитета Совета Министров СССР по науке и технике. **Развитие научно-технической информации в стране.** **Власов Б. В.**, докт. экон. наук. **Научная организация обслуживания производства.** **Ивлев А. И.**, нач. Управления Комитета стандартов. **Стандарты и качество.** **Мифеев А. П.**, докт. техн. наук. **Современный внутризаводской транспорт.** **Смирнов В. И.**, канд. техн. наук. **Прогресс в производстве стали.** **Судоплатов А. П.**, докт. техн. наук. **Технический прогресс горнодобывающей промышленности.** **Шубенко-Шубин Л. А.**, чл.-корр. АН УССР. **Паровые и газовые турбины для большой энергетики.**

Всего 12 брошюр в год средним объемом 48 стр. каждая. Подписная плата на 12 мес. — 1 руб. 08 коп.

В каталоге «Союзпечати» серия «Промышленность» расположена в разделе «Научно-популярные журналы» под рубрикой «Брошюры издательства «Знание».

Издательство «Знание».