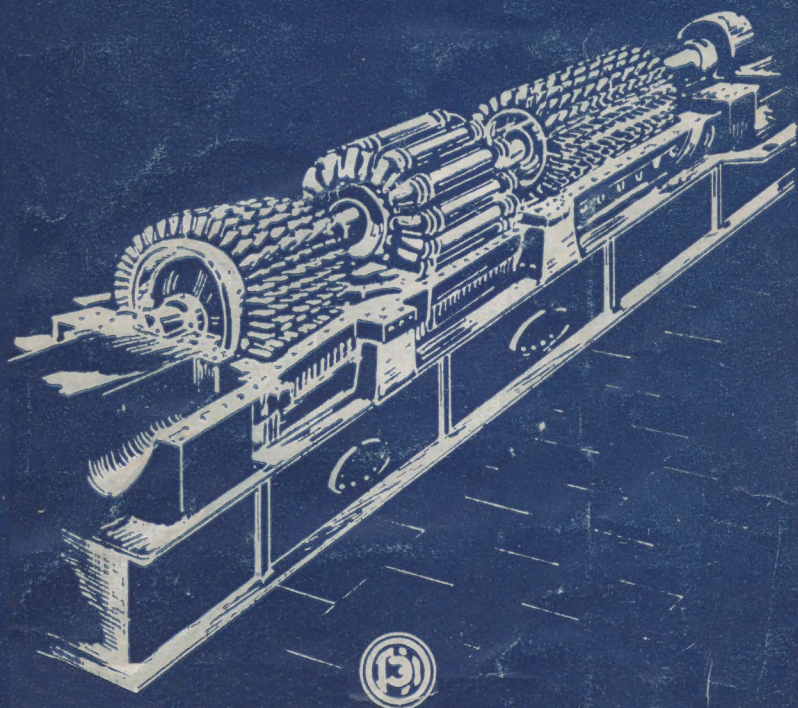


Б.Ляпунов

# ГАЗОВАЯ ТУРБИНА



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

*Б. В. ЛЯПУНОВ*

# *ГАЗОВАЯ ТУРБИНА*



*ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО*

*МОСКВА*

*1951*

*ЛЕНИНГРАД*

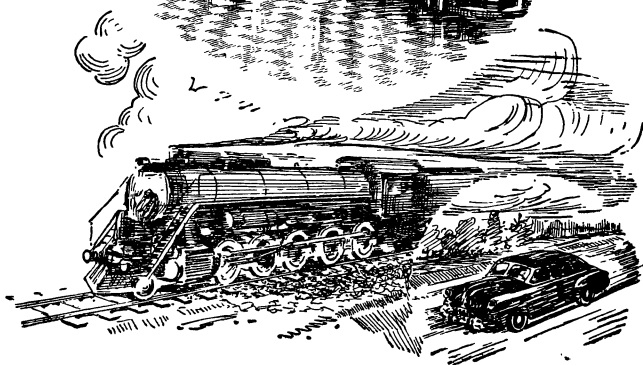
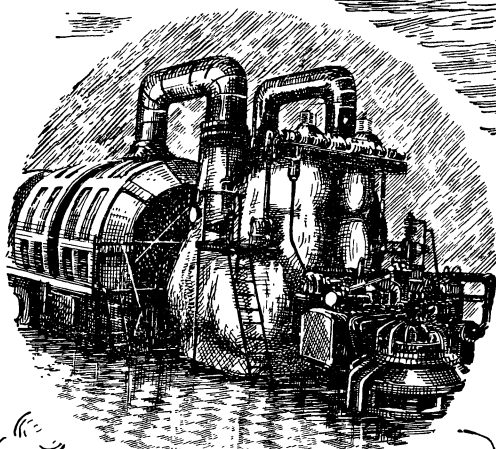
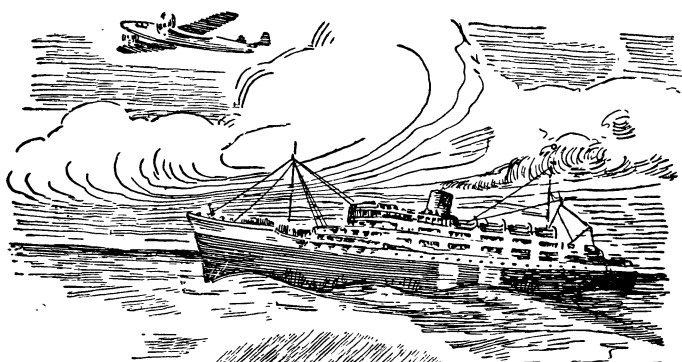


Scan AAW

*Книга представляет собой популярное изложение основных вопросов истории отечественного газотурбостроения, устройства, работы и применения нового типа двигателя — газовой турбины.*

*Книга рассчитана на широкие круги читателей.*

---



---

---

## *Предисловие*

В последние годы газовая турбина нашла широкое применение в авиации и других отраслях техники. Инженеры и техники работают над совершенствованием газовой турбины, расширением областей ее применения. Ряд достоинств этого двигателя и возможность получения в дальнейшем высокой экономичности позволяют ему занять прочное место среди других современных двигателей на транспорте, в промышленности, на электростанциях.

По теории, расчету и конструированию газовых турбин и истории их развития написан ряд фундаментальных трудов. Популярная же литература по газовым турбинам очень бедна.

Настоящая книга является попыткой популярного изложения, доступного для широких кругов читателей, истории отечественного газотурбостроения, устройства работы и применения газовой турбины. Используя ряд примеров из практики газотурбостроения, автор стремился показать, с какими трудностями развивалась и развивается эта новая отрасль техники, каких успехов она добилась.

Автор выражает благодарность доценту В. П. Блюдову, внимательно просмотревшему рукопись и давшему ряд ценных указаний по разделам, относящимся к стационарным и транспортным газотурбинным установкам и истории их развития и лауреату Сталинской премии, профессору Н. В. Иноземцеву за консультацию и ценные указания по разделам, относящимся к авиационным газотурбинным двигателям и истории их развития.

Автор с благодарностью учтет отзывы и пожелания читателей, которые просит прислать в Издательство (Шлюзовая наб., 10).

*Б. Ляпунов.*

---

---

## *Введение*

Мы живем в мире машин. Их огромная армия создана человеком и служит человеку.

Станки на фабриках и заводах, поезда на стальных путях, тракторы и комбайны на колхозных полях, автомобили на дорогах, самолеты в воздухе и корабли в море — все это солдаты армии машин.

Машины помогают человеку делать все: от иголки до многоэтажного дома, от карманных часов до подъемного крана. Все вещи, которые мы видим вокруг, в том числе и сами машины, создаются трудом человека, который управляет армией машин.

Машины помогают человеку переделывать природу. Они умножают силы человека, облегчают его труд. Они служат советскому человеку, который строит гигантские электростанции и каналы, возвращает к жизни мертвые земли пустынь, успешно борется с вековым врагом урожая — засухой.

Машины помогают человеку покорять пространство: перевозят его по суше, по морю или воздуху из одного конца страны в другой, с одного материка на другой.

Кто же дает жизнь нашим стальным помощникам? Двигатели! Без двигателей мир машин был бы мертв.

Без паровой машины остановились бы поезда на железных дорогах. Тяжелые морские корабли не могли бы двигаться без паровой турбины. Не было бы автомобилей и танков, самолетов и дирижаблей, тепловозов и теплоходов без двигателя внутреннего сгорания.

Паровая машина, паровая турбина и двигатель внутреннего сгорания — вот те двигатели, которые заставляют тепло служить человеку.

Сначала появилась паровая машина. Гениальный русский механик И. И. Ползунов первым в мире осуществил

мечту человека об огнедействующей машине для фабрик и заводов.

Рос мир машин. Технике становилось мало паровой машины. В строй тепловых двигателей встали паровая турбина и двигатель внутреннего сгорания.

В последние годы появились еще два новых двигателя. Это — реактивные двигатели и газовые турбины.

Создание реактивных двигателей связано с именем знаменитого русского ученого К. Э. Циолковского. Они применяются в авиации и артиллерии. Ракеты могут поднимать приборы для исследования атмосферы на высоту в несколько сот километров. В будущем реактивные двигатели помогут человеку овладеть верхними слоями атмосферы и межпланетным пространством<sup>1</sup>.

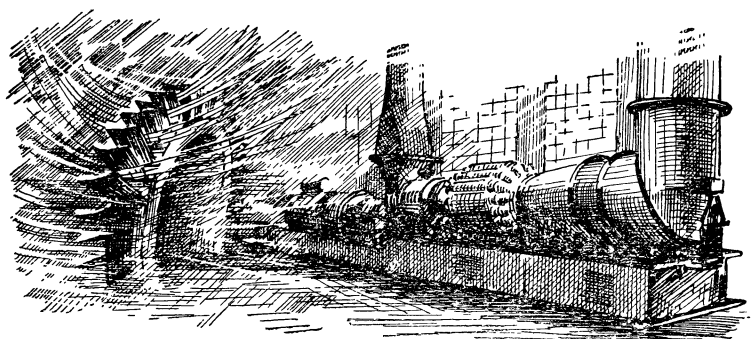
Первая в мире газовая турбина была построена русским инженером П. Д. Кузьминским. Теперь газовая турбина завоевала себе прочное место в авиации и в будущем будет широко применяться на электростанциях, железных дорогах и судах.

Газовая турбина — новый тепловой двигатель — одно из интереснейших достижений техники.

Прошлому, настоящему и будущему газовой турбины и посвящена эта книга.

---

<sup>1</sup> О реактивных двигателях и их применении подробно рассказывается в книге Б. В. Ляпунова, Рассказы о ракетах, Госэнергоиздат, 1950 г.



## ***1. Изобретение, опередившее свое время***

Автор одного шутивого фантастического рассказа отправил своих героев на машине времени в далекое прошлое. Путешественники во времени думали, что они устроят техническую революцию. Подумать только — электрические двигатели в древнем Риме! Вся история перевернулась бы вверх дном. Но... ничего не перевернулось. Древние римляне прекрасно обходились без электромотора, паровой машины и автомобиля. Они им и не требовались. И посрамленные путешественники вернулись обратно в «свое» время, лишний раз убедившись, что всему свое время...

В этой невероятной истории есть, однако, зернышко истины: каждому двигателю — свое время.

Шли века. На смену единственному двигателю древности — мускулам — пришло водяное колесо. На берегах рек появились первые фабрики, и на них заработали первые машины. Машин становилось все больше. И водяное колесо уже не могло справиться со своей работой. К тому же оно привязывало первые фабрики к берегам рек.

И только паровая машина открыла новый век — век пара.

Паровая машина, как мы сказали, появилась раньше других двигателей. Первые паровые машины были устроены очень просто. Пар из котла поступал попеременно в верхнюю и нижнюю полости цилиндра, давил на поршень и двигал его то в одну, то в другую сторону. Дви-

жения поршня передавались кривошипно-шатунным механизмом вала с насаженным на него колесом-маховиком.

Шло время, и паровая машина совершенствовалась. Стали применять отсекку пара. Впустили его в цилиндр и пока он расширяется, двигает поршень, — доступа новой порции пара нет. А тот пар, что попадал в цилиндр, полнее отдавал свою энергию. Полнее стала использоваться энергия пара, а расход его уменьшился. Этому способствовал также обогрев стенок цилиндра.

Пар — основа паровой машины, как говорят, ее рабочее тело. Пар стремится заставить работать все лучше и лучше. Его заставляют многократно расширяться — не в одном цилиндре, а в нескольких, полнее отдавать свое тепло. Его перегревают и под большим давлением подают в машину. До  $500^{\circ}\text{C}$  и 130 атмосфер доходят температура и давление пара в современных паровых машинах. И эта современная паровая машина шагнула далеко вперед от своих предков.

Паровая машина — основной двигатель на паровозах.

Паровая машина вращает гребной винт парохода. Там, где много леса, угля и торфа, ее часто можно встретить на небольших фабриках и электростанциях. Пытались применить паровую машину на автомобилях и даже на самолетах.

Но есть у паровой машины большой недостаток — из-за своих стальных рук (шатунів) она очень громоздка и тихоходна.

Уже в середине прошлого века бурно растущей промышленности потребовался новый мощный, быстроходный двигатель. Такой двигатель требовался электростанциям, потому что наступал век электричества.

И в конце прошлого века в технике появился новый двигатель — паровая турбина.

Осталось все, что связано с получением пара — топка, котел и вспомогательные механизмы. Но работает пар в турбине не в цилиндре с поршнем, а на лопатках турбинного колеса, вращая его.

Паровая турбина тоже развивалась и улучшалась. В ней стал применяться перегретый пар высокого давления и другие усовершенствования.

Паровая турбина — мощный и быстроходный двигатель. В нашей стране уделяется большое внимание постройке мощных турбин. Ленинградский металлический

завод им. Сталина выпустил перед войной первую в мире турбину в 100 000 квт. После войны завод построил первую в мире турбину высокого давления мощностью в 100 000 квт. Товарищ Сталин поздравил советских турбостроителей с выдающимся достижением и пожелал им дальнейших успехов «в деле обеспечения технического прогресса в советском энергомашиностроении».

Работы советских турбостроителей были удостоены высокой награды — Сталинской премии.

Там, где нужны огромные мощности — на больших электростанциях, на гигантских морских судах, где нужны десятки и сотни тысяч лошадиных сил, — там нужна паровая турбина.

Без нее были бы немыслимы современные крупные корабли, мощные электростанции.

Однако и паровая машина и паровая турбина нуждаются в котельной для того, чтобы получать пар для своей работы. Топливо отдает в них свою энергию через посредника — пар. Этот посредник не нужен двигателю внутреннего сгорания.

В двигателе внутреннего сгорания — поршневом, как и в паровой машине, поршень двигает газы, образующиеся при сгорании топлива. Двигатель внутреннего сгорания широко применяется в народном хозяйстве и в обороне страны — на автомобилях, танках, тракторах, судах, подводных лодках, самолетах, тепловозах.

У каждого двигателя есть свои достоинства и недостатки.

Паротурбинная установка — мощная, быстроходная, работающая непрерывно, без толчков. Но в ней работает пар. Чтобы его получить, нужны топка и котел.

Двигателю внутреннего сгорания топка и котел не нужны. Рабочее тело — газ — получается в самом цилиндре. Поэтому этот двигатель легче паротурбинной установки, занимает меньше места и работает с более высоким к. п. д. Но зато мы не получаем в нем сразу вращательного движения, которое достигается лишь при помощи кривошипно-шатунного механизма, и «потолок» мощностей у него ниже, чем у паровой турбины. Кроме того, он в большинстве случаев требует более дорогого дефицитного жидкого топлива.

Над созданием какого же двигателя работают сейчас инженеры?

Такого, который не имел бы недостатков этих двигателей.

Такого, который имел бы их достоинства.

Этот двигатель должен быть мощным и компактным, т. е. он должен быть турбиной.

Он должен быть легким, т. е. он должен быть двигателем внутреннего сгорания.

Этот двигатель — турбина внутреннего сгорания.

Пар вращает колесо паровой турбины. Горячие газы, расширяясь, толкают поршень поршневого мотора. В новом двигателе газы вращают турбинное колесо (фиг. 1).

Поэтому новый двигатель называют иначе газовой турбиной.

Но значит ли, что с появлением газовой турбины станут ненужными все другие двигатели?

Нет, не значит. Универсального двигателя быть не может. Каждому двигателю найдется своя работа — там, где он наиболее выгоден. Применение двигателя зависит от его качеств. А эти качества меняются со временем. И паровые двигатели, возможно, будут применяться даже тогда, когда мы научимся использовать атомную энергию.

Двигатель внутреннего сгорания также будет нужен нам и в будущем.

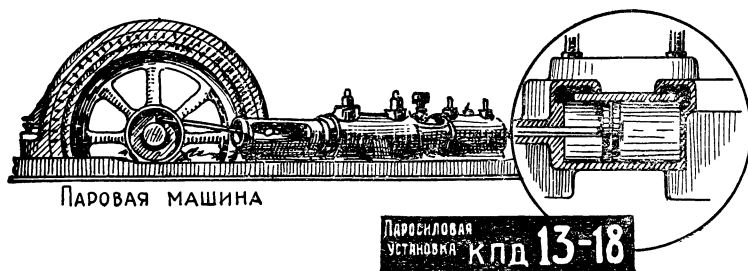
Нужен нам и новый мощный, легкий и быстроходный двигатель — газовая турбина.

Турбина внутреннего сгорания и паровая машина оказались почти ровесниками, но применяться новый двигатель стал сравнительно недавно.

Идея нового двигателя — газовой турбины появилась в XVIII в: первый патент на газовую турбину был выдан в Англии в 1791 г. Изобретатель предполагал, что его турбина сможет... «вращать вертел, мотать пряжу, звонить в колокола, качать колыбель и удовлетворять прочие нужды домашнего хозяйства»...

Но это было изобретение, опередившее свое время. Тогда вполне хватало паровой машины. Новый, более мощный, двигатель потребовался значительно позднее. Тогда-то и начали строить турбины — сначала паровые, а затем газовые.

Да и построить газовую турбину было не под силу технике XVIII и даже XIX вв.



Фиг. 1, Современные тепловые двигатели.

Первая в мире газовая турбина была построена лишь в 1897 г. русским инженером Павлом Демьяновичем Кузьминским. Но и после этого прошло еще около 40 лет, прежде чем новый двигатель вышел из стен лабораторий и начал занимать свое место в технике.

Его история — это история о том, как осуществлялась мечта инженеров о самом простом, мощном и экономичном тепловом двигателе.

Вряд ли есть машина, которой различные исследователи, специалисты и не специалисты занимались бы больше, чем газовой турбиной.

Газовая турбина устроена несложно, но построить ее так, чтобы она хорошо работала, оказалось не так просто.

В самом деле принцип действия ее очень несложен, мы о нем уже говорили, когда знакомились с двигателями.

В газотурбинной установке есть три основных части: компрессор, камера сгорания и собственно турбина. И каждая из них потребовала много лет упорного труда.

Одной из важнейших ее частей является компрессор — сжиматель воздуха. Слово «компрессия» и означает «сжатие».

Компрессоры широко применяются в технике. Сжатый воздух нужен в металлургии — при производстве чугуна и стали, в химии — при переработке нефти. Сжатый воздух приводит в движение различные механизмы — например, пневматические молотки и другие инструменты.

Компрессор нужен и для газовой турбины. В газотурбинной установке сжатый компрессором воздух поступает в камеру сгорания, участвует в горении топлива и вместе с продуктами сгорания расширяется на лопатках турбины, заставляя ее вращаться. При расширении давление газов падает обычно почти до атмосферного.

Поршневой компрессор, в котором воздух сжимается поршнем в цилиндре, слишком тихоходен для быстроходной газовой турбины и не справился бы с задачей питания газотурбинного двигателя воздухом.

Совершенствуя компрессор, инженеры пошли по тому же пути, который привел от паровой машины к паровой турбине.

Поступательное движение поршня они заменили вращением диска с лопатками, как в паровой турбине.

Если турбину вращать, она будет сжимать воздух. Турбина из нескольких ступеней — дисков с лопатками, приводимая во вращение мотором, — таков был первый компрессор нового типа. Воздух сжимался лопатками при вращении турбинного диска. Таких дисков было несколько: компрессор был многоступенчатым. От ступени к ступени воздух сжимался все сильнее и сильнее, до нужного давления. Двигался воздух вдоль оси компрессора, от одного диска к другому. Поэтому компрессор был назван осевым.

И в современных газотурбинных двигателях мы увидим несколько дисков с лопатками — ступеней, где сжимается воздух. Это такой же многоступенчатый осевой компрессор, как и предложенный 70 лет назад.

Кроме осевого, в дальнейшем появился и другой тип компрессора — центробежный, применяемый теперь в авиационных газотурбинных двигателях. Работает он иначе, чем осевой. Центробежный компрессор — это тоже диск с лопатками, но лопатки эти не такие, как у осевых компрессоров. «Центробежная» лопатка напоминает завиток архимедовой спирали: она изгибается от центра диска к его краям. Это лопатка радиального типа, потому что она проходит в направлении радиуса. Когда диск вращается, такая лопатка отбрасывает воздух от центра к краям диска, и воздух сжимается центробежной силой.

Осевой компрессор, как мы видели, — старая идея, лишь теперь нашедшая применение в технике газотурбостроения. Она оказалась не единственной. Одновременно была предложена еще одна интересная идея — теплообменник.

Горячие газы, пройдя турбину, выбрасываются наружу. С ними выбрасывается тепло. Для использования тепла отходящих газов их можно пропускать между трубками теплообменника, чтобы газы нагревали проходящий в трубках воздух.

Теплообменник — батарею труб, где подогревается воздух, — мы увидим в современной газотурбинной установке. Эта старая идея нашла себе применение в газовых турбинах спустя несколько десятков лет.

Паровая турбина стояла перед глазами изобретателей, когда они проектировали газовые турбины. Неудивительно поэтому, что в проектах газовых турбин многие

части были заимствованы у паровых турбин. Это тем более понятно, что сама газовая турбина похожа на паровую: такой же диск с лопатками, но только вращаемый не струей пара, а струей горячего газа.

Между ними есть, однако, и большое различие.

Казалось бы, какая разница — подавать на лопатки турбины пар или газ? А между тем... Паровая турбина работает непрерывно несколько лет. Авиационная газовая турбина служит теперь только несколько сот часов.

У газовой турбины есть враг. Этот враг — высокая температура, он подстерегает турбину на каждом шагу.

В двигатель стало меньше поступать воздуха — и турбина в опасности. Температура газов, поступающих в турбину, возрастает.

Высокая температура искрошит лопатки турбины. Они обгорают как бумага, хотя сделаны из прочного жаростойкого сплава.

Высокая температура, нужная для турбины, может разрушить ее, если она слишком велика.

Пар имеет температуру до  $500^{\circ}\text{C}$ . Газы, идущие на лопатки турбины, нагреты до  $650\text{—}900^{\circ}\text{C}$ . Поэтому те материалы, из которых делается паровая турбина, не пригодны для газовой.

И только когда были получены прочные жаростойкие материалы для турбин, отпала надобность в сложных устройствах, сводящих на нет главное достоинство газовой турбины — ее простоту.

Пока же таких материалов не было, строители газовых турбин вынуждены были идти различными обходными путями.

Множество хитроумных способов придумывали они, чтобы обойти затруднения, связанные с высокой температурой газов в газовой турбине.

Горячие газы предлагали охлаждать, смешивая их с водой или паром в парогазовой турбине. Первая построенная газовая турбина была парогазовой.

Придумали «мокрогазовую» турбину, в которой попытались избавиться от... газа. В этой турбине при помощи вспышки газов попеременно перегоняли из одного цилиндра в другой столб воды, который по пути вращал рабочее колесо уже не газовой, а водяной турбины. Но такая «мокрая турбина» работала плохо. Для хорошей

ее работы нужно было плавное движение воды, без больших ускорений. Сила равна произведению массы на ускорение. А так как ускорение должно быть небольшое, масса воды должна быть большой, чтобы получить достаточную силу для вращения колеса. Из-за этого цилиндры и вся машина будут непомерно больших размеров. И как ни пытались усовершенствовать «мокрую» турбину, работала она плохо, была очень громоздкой и тихоходной.

Но вернемся к «сухим» газовым турбинам.

Есть еще один путь: разбавить поток горячих газов воздухом. Тогда компрессору достанется очень тяжелая работа, а вместе с ним и турбине. Ведь турбина сама вращает компрессор, сидящий с ней на одном валу, и тратит на это часть своей мощности.

Чтобы уменьшить трату мощности на компрессор (относительную мощность компрессора), пошли обходным путем,— была предложена турбина взрывного типа.

Первая такая турбина была построена в 1908 г. инженером Караводиным. Устроена она была очень просто.

В камере сгорания имелся клапан. Вспышка! Топливо в камере сгорало, давление увеличивалось и закрывало клапан. Газы же по длинной трубе поступали в турбину. Давление в камере сгорания после этого падало, и клапан открывался, пропуская новую порцию воздуха и горючего. Снова вспышка — и за три сотых секунды все повторяется сначала.

Турбина давала 10 000 об/мин. Но сжатие воздуха без компрессора было слабым.

Тогда взрывную турбину устроили с компрессором. Взрывной эта турбина названа потому, что сгорание в ней происходит прерывисто, взрывами. При «взрыве» давление газов возрастает до значительно большей величины, чем давление, создаваемое компрессором. Газы с высоким давлением после камеры сгорания расширяются в турбине до атмосферного давления, при котором в компрессор засасывается воздух. Перепад давлений (отношение давления на входе к давлению на выходе) в турбине значительно больший, чем в компрессоре. Относительная мощность компрессора (по сравнению с турбиной) невелика.

Тем самым старались обойти два препятствия, стоявшие на пути газовой турбины.

Первое из них — отсутствие высокопрочных жароупорных материалов.

Второе — отсутствие хорошо работающего компрессора, который должен был бы подавать огромные количества воздуха — десятки тысяч кубических метров в час.

И то и другое появилось значительно позже.

Вот почему взрывные турбины и привлекали к себе внимание.

Почти четверть века занимались за границей этими турбинами.

Было построено несколько опытных турбин. Испытания их дали сравнительно неплохие результаты.

Но все же взрывная турбина была много сложнее турбины непрерывного сгорания. Ее взрывная камера напоминала цилиндр поршневого мотора. Остались клапаны, которые должны надежно закрывать камеру сгорания и также надежно открываться — точно тогда, когда это нужно. Кроме того, пришлось охлаждать водой камеру сгорания и турбинное колесо с лопатками. Чтобы не пропадало зря тепло, получаемой этой водой, и тепло уходящих газов, его решили в одной из турбин использовать для получения пара. У газовой турбины появилась камера сгорания, играющая также роль парового котла. Паром же стали питать паровую турбину, которую приспособили вращать... компрессор газовой турбины. В результате вся газотурбинная установка настолько усложнилась, что в получившейся газопаротурбине немецкой конструкции сама газовая турбина составляла лишь часть очень громоздкой машины.

Удачные испытания взрывных турбин и дали повод некоторым зарубежным специалистам считать, что будущее за такими турбинами.

Испытания же турбин непрерывного сгорания давали в то время худшие результаты.

В 1905 г. во Франции построили опытную турбину непрерывного сгорания. Испытания дали такой результат: к. п. д. — 3%! Турбина еле-еле справлялась с задачей покрывать мощность, идущую на ее собственный компрессор. Она давала мощность 480 л. с. и из них 400 шло на привод компрессора!

Советская наука не пошла по пути, принятому некоторыми зарубежными специалистами, стремившимися уже

сейчас осуществить на практике идею турбины взрывного типа.

Передовая наука «...имеет смелость, решимость ломать старые традиции, нормы, установки, когда они становятся устарелыми, когда они превращаются в тормоз для движения вперед»... (И. Сталин).\*

Отечественная энергетика весьма большое внимание уделяла и уделяет газовым турбинам непрерывного сгорания. Развитие таких турбин — целесообразный путь развития газотурбостроения в настоящее время.

На это указывал еще в начале 20-х годов выдающийся советский ученый профессор В. М. Маковский, много лет работавший над газовыми турбинами. Он написал книгу «Опыт исследования турбины непрерывного сгорания», в которой обосновал идею применения таких турбин в современной энергетике.

Преимущества турбины непрерывного сгорания перед взрывной турбиной показали также исследования советского инженера Г. И. Зотикова. Такие турбины удобнее и лучше потому, что конструкция их значительно проще.

Благодаря работам ведущих турбостроительных заводов нашей страны (Ленинградского металлического завода имени Сталина, Невского машиностроительного завода имени Ленина, Харьковского турбогенераторного завода) научно-исследовательских институтов (Всесоюзного теплотехнического института, Центрального котло-турбинного института, Московского энергетического института) и отдельных ученых (Уварова, Жирицкого, Шнеэ, Блюдова, Зотикова, Гринберга, Кузнецова и других) были сконструированы и созданы отечественные стационарные газовые турбины.

Раньше считали, что газовая турбина непрерывного сгорания может выгодно работать лишь при температуре газов не меньше 1 000° С. Только тогда расход топлива будет не слишком велик. Это задерживало развитие газовых турбин и, в частности, авиационных, так как не было необходимых жаростойких материалов для таких температур. Советский инженер А. М. Люлька доказал, что для авиационных газовых турбин при больших скоростях

---

\* Сталин И. В. „Речь на приеме в Кремле работников высшей школы 17 мая 1938 г.“ Госполитиздат 1938 г.

полета достаточно применять температуры 800—900° С. А материалы, выдерживающие такие температуры, тогда уже имелись. Тем самым газовой турбине была открыта дорога в авиацию. Работы советских ученых и инженеров помогли раскрыть возможности турбины непрерывного сгорания. Такие турбины и применяются теперь в советской и мировой технике.

\*   \*

\*

Идея использования тепла отходящих газов не была заброшена, она была поставлена с головы на ноги. Не паровой котел в помощь газовой турбине, а, наоборот, газовая турбина в помощь котлу.

Здесь нам придется сделать небольшое отступление.

Пока газовая турбина еще не встала окончательно на ноги, ее нужно было научить ходить. Для этого турбину попробовали применить вместе с двигателем внутреннего сгорания. Выхлопные газы такого двигателя еще обладают энергией, которая теряется, когда газы выбрасываются в атмосферу. Эту энергию оказалось возможным использовать. Ведь двигатель работает одновременно и как двигатель, и как насос. После каждого рабочего хода, когда газы двигают поршень, цилиндр нужно продуть от оставшихся газов и наполнить его свежим воздухом (в двигателе дизеля).

Небольшая газовая турбина, работающая на выхлопных газах двигателя, стала приводить в движение воздуходувку, чтобы продувать цилиндры и наполнять их свежим воздухом.

Продувка и наддув дизеля были одним из первых практических применений газовой турбины.

Надо заметить, что такая турбина не является по существу турбиной внутреннего сгорания. У нее нет камеры сгорания и компрессора. Она работает на готовом нагретом газе другого двигателя, утилизирует его. Ее можно назвать утилизационной газовой турбиной.

За первым шагом последовал и второй

Еще в конце первой мировой войны в военной авиации испытывались турбокомпрессоры, служащие для подачи воздуха в авиационный двигатель.

Турбокомпрессор — это небольшая турбина, работающая на выхлопных газах авиадвигателя, с компрессором, сжимающим воздух.

Плотность воздуха с подъемом на высоту, уменьшается. На высоте 10 км плотность составляет всего 34 % плотности воздуха на уровне моря, а на высоте 20 км — 7 %. Раз плотность воздуха убывает, то в двигатель попадает все меньше кислорода, нужного для сгорания топлива. Двигатель «задыхается».

На помощь ему приходит турбокомпрессор. Он подает в двигатель столько воздуха, сколько необходимо для нормального сгорания.

На пути создания надежно работающих турбокомпрессоров стояли большие трудности. Выхлопные газы, вытекающие со сверхзвуковой скоростью, бывают нагреты до температуры около 1 000° С. Турбина турбокомпрессора делает до 30 000 оборотов в минуту, и на лопатку действует огромная центробежная нагрузка, в десятки тысяч раз превышающая ее вес.

Нужны поэтому особо прочные материалы и, кроме того, охлаждение лопаток и колеса турбины.

Советские инженеры преодолели эти трудности и создали ряд конструкций турбокомпрессоров, вполне оправдавших себя в работе.

Теперь только высотные моторы имеют права гражданства в авиации. Турбокомпрессор стал необходимой частью таких моторов.

Кроме турбокомпрессоров, в авиации применяются турбореакторы.

Турбокомпрессор служит для сжатия воздуха.

Турбореактор служит для увеличения мощности двигателя. Компрессора у него нет. Турбина, питаемая выхлопными газами, передает свою мощность не компрессору, а двигателю — вал ее соединен через передачу с валом мотора.

На авиамоторе могут быть и турбокомпрессор и турбореактор.

Утилизационные газовые турбины можно питать не только выхлопными газами двигателей.

Для нее годятся отходящие газы различных промышленных производств — металлургических, химических и других.

В Советском Союзе на нефтеперерабатывающих заводах работают газовые турбины.

Интересным применением утилизационной газовой турбины была турбовоздуходувка для парового котла.

В некоторых паровых котлах сгорание топлива происходит под давлением. Сжатый воздух подается в топку компрессором, а отработавшие газы используются в газовой турбине.

Для таких котлов нужны были и жароупорные материалы, и хорошо работающие компрессоры.

Но ведь того же не хватало и газовой турбине. Неудивительно, что создание таких котлов было шагом к газовой турбине. Этот шаг помогли сделать аэродинамика и металлургия.

Развитию компрессоров помогло развитие авиации. Это наглядный пример того, как различные области науки и техники помогают друг другу решать самые разнообразные и, казалось бы, далекие, совсем не похожие одна на другую, задачи.

Какая, кажется, связь между осевым компрессором и крылом самолета?

Крыло самолета «в сечении», «в профиль» имеет своеобразную форму,— одна поверхность его изогнута сильнее, чем другая. Воздух двигается поэтому вдоль обеих поверхностей крыла неодинаково. Тем частицам, которые обтекают более изогнутую поверхность, приходится двигаться быстрее, чем остальным частицам. Поэтому скорость воздуха над крылом — там, где поверхность более изогнута,— больше, чем под крылом. Скорость и давление воздушного потока связаны между собой: если скорость увеличивается, давление падает, и наоборот. Над крылом скорость больше, под крылом — меньше, и давление там возрастает. Возникает подъемная сила, поддерживающая крыло, а с ним и весь самолет в воздухе.

Впервые объяснил причину возникновения подъемной силы замечательный русский ученый, творец аэродинамики — науки о движении тел в воздухе — Николай Егорович Жуковский.

Лопатка осевого компрессора «в сечении», «в профиль», похожа на крыло самолета. При вращении ротора компрессора лопатка, подобно крылу, двигается в потоке воздуха, и воздух, обтекая ее, сжимается по тем же причинам, по которым возникает подъемная сила.

Работу лопатки стали исследовать так же, как исследуют работу крыла самолета.

Вырабатывались наиболее правильные формы лопаток, и в результате большой и сложной работы крепко встал на ноги осевой компрессор, нужный газовой турбине «как воздух».

Металлурги разработали высокопрочные жароупорные сплавы для газовых турбин.

Мечта о простом и мощном двигателе становилась явью.

Ученые исследовали работу газовой турбины. Здесь особенно нужно отметить работы советских ученых. Профессор В. М. Маковский, о котором мы говорили, в своих трудах исследовал работу турбины непрерывного сгорания. Он показал, каких результатов можно ожидать от газовой турбины. Он предсказал, что газовая турбина догонит лучшие паровые турбины и подробно обосновал это расчетами.

Академик С. А. Чаплыгин разработал основы новой науки — газовой динамики. Другие советские ученые успешно продолжили его труды.

В турбине газы двигаются с огромными скоростями, приближающимися к скорости звука.

Движение с такими скоростями отличается своими особенностями. Газовая динамика изучает эти особенности и служит теоретическим оружием для совершенствования машин, в которых происходит движение газов с большими скоростями, — скоростных самолетов, ракет, реактивных двигателей, газовых турбин.

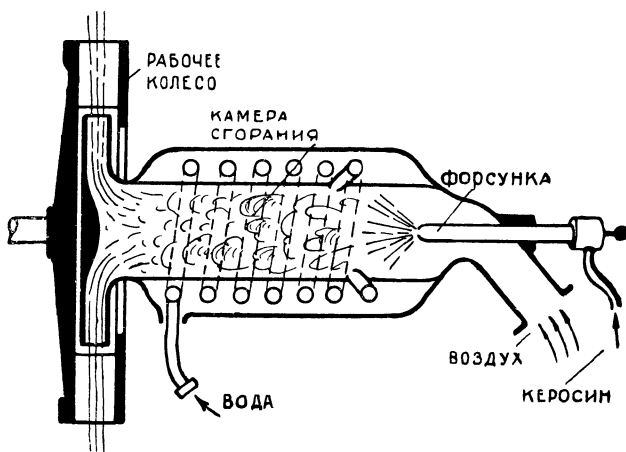
Наша отечественная наука и техника внесли огромный вклад в развитие газотурбостроения.

Честь постройки первой газовой турбины принадлежит России.

В 1897 г. инженер П. Д. Кузьминский построил первую в мире газотурбинную установку (фиг. 2).

Турбина Кузьминского была рассчитана для работы на смеси продуктов сгорания и пара — парогазе. Камеру сгорания своей установки Кузьминский назвал поэтому «газопарород». Камера имела два цилиндра — внутренний и внешний. Внутренний был сделан из жароупорного сплава, а внешний — из стали. Если мы посмотрим на камеру сгорания современного газотурбинного двигателя, то увидим, что она также состоит из двух труб — внутренней «пламенной» трубы и внешней воздушной камеры.

Между цилиндрами камеры Кузьминский поместил змеевик — изогнутые трубки, по которым протекала под давлением вода. В камере вода испарялась и превращалась в пар. Одновременно туда подавались воздух и топливо (керосин). Парогазовая смесь направлялась на лопатки многоступенчатой турбины, состоящей из нескольких дисков с лопатками. Между каждым двумя вращающимися дисками был поставлен неподвижный диск, тоже



Фиг. 2. Схема устройства газовой турбины  
П. Д. Кузьминского (1897 г.).

с лопатками, служившими для придания потоку строго определенного направления.

Если мы посмотрим на современную многоступенчатую турбину, то увидим, что она также состоит из вращающихся дисков и неподвижного направляющего аппарата.

Камера сгорания и турбина установки Кузьминского были построены, камера сгорания успешно прошла испытания.

Турбина Кузьминского была турбиной непрерывного сгорания.

Идея газовой турбины непрерывного сгорания, получившей теперь широкое применение в технике, впервые была осуществлена русским инженером.

Наша страна — пионер газотурбостроения.

Нашими изобретателями были предложены очень интересные проекты газовых турбин.

Советский изобретатель профессор А. Н. Шелест в 1920 г. предложил газовую турбину для тепловоза. По проекту Шелеста в газотурбовозе применен комбинированный двигатель, состоящий из газовой турбины и поршневого двигателя. Газы из камеры сгорания, охлажденные до температуры около  $600^{\circ}\text{C}$ , направляются в турбину и далее в поршневой двигатель, связанный с осями тепловоза.

Оригинальную турбину предложил инженер Я. М. Гаккель. По его проекту на окружности турбинного колеса расположены сопла, к которым по трубкам подводится горючее. Воздух, попадающий в сопло, смешивается с горючим, а газы, вытекающие через выходное отверстие сопла, вращают турбину, подобно сегнерову колесу.

Много других советских изобретателей занимались разработкой газовых турбин.

То, над чем работали, о чем мечтали поколения инженеров, ученых и изобретателей, успешно осуществляется.

В 1939 г. была построена опытная газовая турбина конструкции профессора В. М. Маковского для работы на газе, получаемом при подземной газификации угля. Эта турбина работала на опытной шахте «Подземгаз» в Горловке (фиг. 3).

Работы по газовым турбинам продолжались и в военное, и в послевоенное время.

На Невском машиностроительном заводе им. Ленина в Ленинграде была построена первая отечественная промышленная стационарная газотурбинная установка (фиг. 4).

На заводах Советского Союза проектируются и строят теперь различные типы газовых турбин.

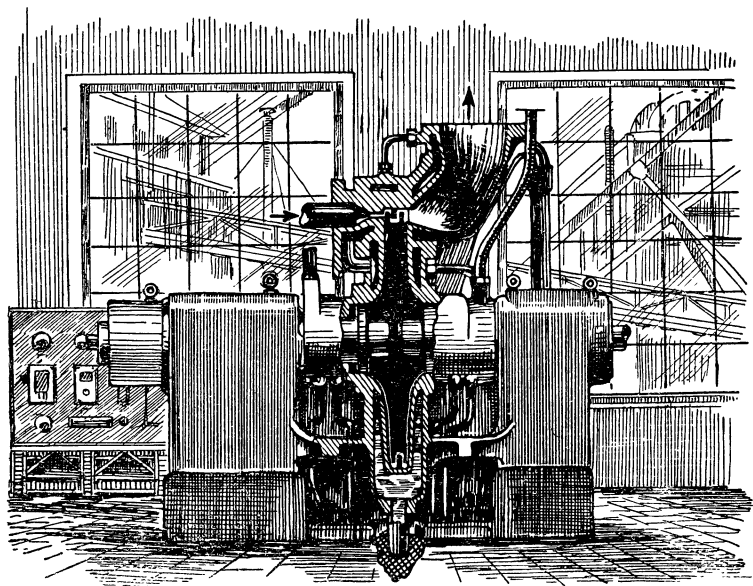
Так развивается новая отрасль техники — газотурбостроение. Газовая турбина выходит, наконец, на широкую арену и становится постепенно самостоятельным двигателем.

Таким двигателем она уже стала в авиации.

Каждый из нас знает, что такое удельный вес. Но слышали ли вы об удельном весе двигателя? Нельзя же взять  $1\text{ см}^3$  автомобильного мотора, взвесить его и сказать: «удельный вес этого мотора 200 граммов на кубический сантиметр». Но, тем не менее, с понятием удель-

ного веса двигателя приходится сталкиваться каждому, кто интересуется моторами. Удельный вес — это такая же важная характеристика мотора, как и мощность. Мало сказать, что двигатель весит тонну или что он развивает мощность в тысячу лошадиных сил. Двигатели одного веса могут быть разной мощности и наоборот — одной мощности, но разного веса.

Удельный вес двигателя — это отношение веса двигателя к развиваемой им мощности. Удельный вес двига-



Фиг. 3. Газовая турбина проф. В. М. Маковского.

теля показывает, таким образом, сколько приходится веса на каждую единицу мощности.

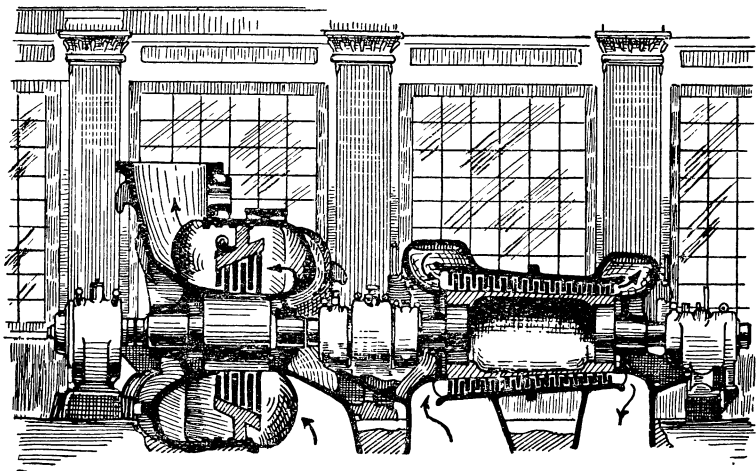
Удельный вес двигателя особенно важен для авиации. Чем больше удельный вес, тем больше весит мотор, а лишний вес — это меньше горючего, пассажиров, грузов, меньше высота и дальность полета. Удельный вес авиационного двигателя с газовой турбиной значительно меньше, чем у поршневого мотора. Газотурбинный авиационный двигатель проще по конструкции и управлению, чем поршневой, меньше его по размерам и мощнее. Не-

удивительно поэтому, что авиация и была первой областью техники, где начали широко применять газовые турбины.

Во время второй мировой войны появились первые реактивные самолеты с газовыми турбинами.

Ежегодно, в день Воздушного Флота СССР, над Тушинским аэродромом проносятся советские реактивные самолеты, вызывая восхищение и гордость за нашу Сталинскую авиацию — лучшую в мире.

Ведется работа и над другими газовыми турбинами — для железнодорожного, речного и морского транспорта.



Фиг. 4. Газовая турбина и компрессор Невского машиностроительного завода им. Ленина.

Пока что газовая турбина не может соперничать с паровыми установками на электростанциях.

Но электростанции приходится работать неровно. Рано утром, когда встают рабочие и служащие, собираются на работу, вечером, когда загораются лампочки в домах и на улице — растет нагрузка на станции. И так несколько раз в сутки — часы «пик». Тут-то и приходит на помощь газовая турбина — резервный двигатель на электростанции, помогающая паровой турбине.

Когда же газотурбинная установка догонит дизель и перегонит паросиловую установку по экономичности,—

она появится на электростанциях как основной двигатель. Опытные газотурбинные электростанции строятся уже сейчас.

В связи с этим большое значение приобретает постройка стационарных газовых турбин, предназначенных не для транспорта, а для промышленности и электростанций.

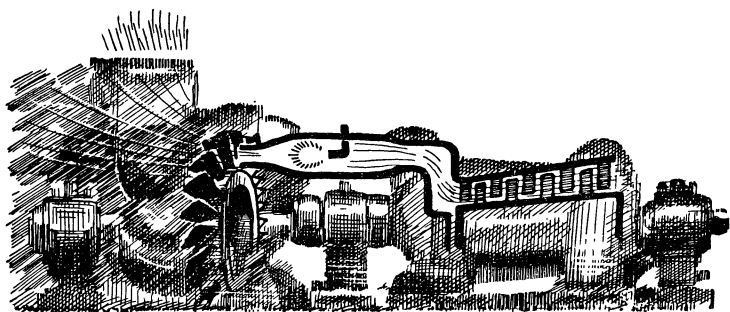
В ближайшие годы газовая турбина будет широко применяться в народном хозяйстве нашей страны.

От проектов, десятками лет остававшихся на бумаге, к современным мощным газотурбинным установкам, в будущем — самых мощных, самых экономичных тепловых машин — таков двухвековой путь газовой турбины.

Итак, мы познакомились с биографией газовой турбины.

Перейдем теперь от прошлого газовой турбины к ее настоящему и будущему.

---



## *2. Новый тепловой двигатель*

Наиболее распространенным типом газотурбинных установок является установка с турбиной непрерывного сгорания незамкнутого типа. Как и в двигателе внутреннего сгорания, отработанные в такой установке газы выбрасываются в атмосферу. Эту установку мы встретим на реактивных самолетах, газотурбинных судах, локомотивах, на заводах и электростанциях.

Но где бы мы ни встретили ее, мы всегда найдем в ней три основные части: компрессор, камеру сгорания и турбинное колесо с лопатками. У каждой из этих частей — своя работа.

Компрессор питает камеру сгорания воздухом.

Камера сгорания питает турбину горячими газами.

Турбина вращает какой-либо механизм (например, генератор электрического тока или вал самолета), а заодно с ним и компрессор, сидящий на том же валу.

Мы можем теперь составить схему самого простого газотурбинного двигателя (ГТД) (фиг. 5).

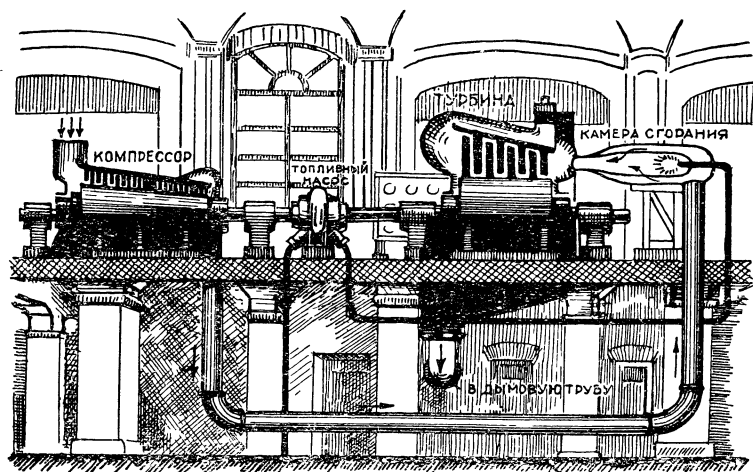
Всем известны «четыре такта» работы двигателя внутреннего сгорания. Вот они: всасывание — в цилиндр поступает рабочая смесь, сжатие — поршень сжимает рабочую смесь, которая в конце такта воспламеняется, расширение — газы двигают поршень, и выхлоп (удаление продуктов сгорания). Есть ли что-нибудь похожее на эти такты в работе нашего ГТД?

Сжатие и расширение есть в нашей схеме. Два такта мы нашли.

Есть у нас и процессы, напоминающие остальные такты.

В газотурбинной установке незамкнутого типа газы расширяются почти до атмосферного давления и происходит их выбрасывание в атмосферу через выпускную трубу.

Процессы, напоминающие знакомые четыре такта! Только происходят они иначе — не друг за другом,



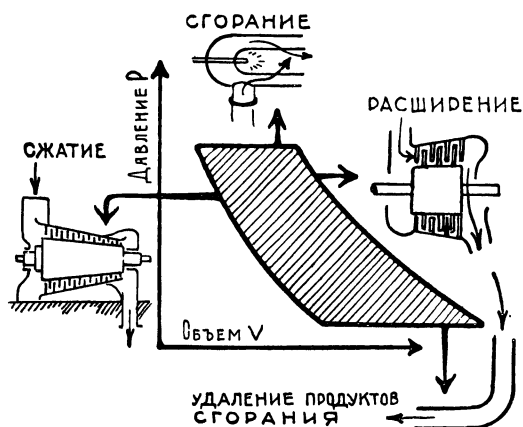
Фиг. 5. Простейшая схема ГТД.

а одновременно, непрерывно. Это возможно потому, что действие разыгрывается не в одном месте, как у двигателя внутреннего сгорания — в цилиндре, а в разных местах ГТД. Всасывание и сжатие происходят в компрессоре, сгорание — в камере сгорания, расширение — в турбине.

Сначала газы поступают в сопловой аппарат турбины. Это неподвижные каналы, расположенные по окружности перед лопатками турбинного колеса. Проходя по этим каналам, газ расширяется, скорость его увеличивается до нескольких сот метров в секунду. Затем газовая струя проходит по изогнутым каналам, которые образуются между лопатками турбинного колеса, путь газа искривляется, и возникает усилие, действующее на стенку этого канала, т. е. на лопатку. Оно и заставляет вращаться весь турбинный диск.

Кроме четырехтактных, имеются еще двухтактные двигатели внутреннего сгорания. Первый такт — сжатие и сгорание, второй — расширение и выхлоп. А если мы возьмем двухтактный дизель, в котором вместо смеси топлива и воздуха сжимается чистый воздух, то работа его весьма напоминает процессы, идущие в газовой турбине. И там и там сжимается чистый воздух, затем впрыскивается топливо, и воспламеняется, а далее происходит расширение продуктов сгорания и выход их в атмосферу.

Работу газотурбинной установки, как и поршневого двигателя, можно представить себе очень наглядно, на-



Фиг. 6. Схема работы газотурбинной установки.

блюдая изменение состояния газа, или, как принято говорить, «рабочего тела» в ней (фиг. 6).

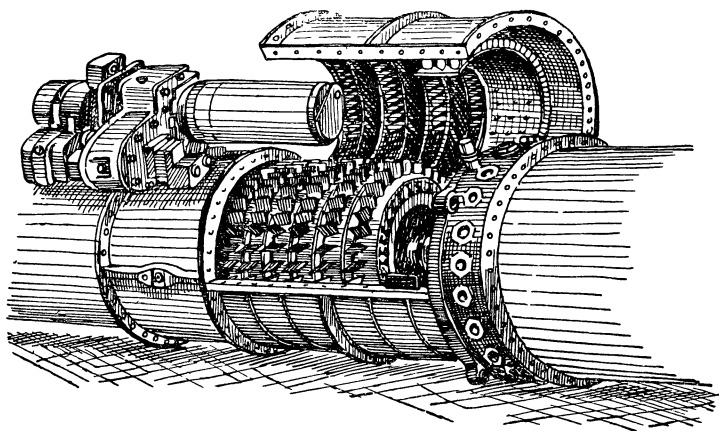
Рабочее тело совершает цикл, который можно изобразить графически, откладывая по горизонтали объем, а по вертикали — давление. Весь цикл газотурбинной установки изобразится замкнутой фигурой, состоящей из нескольких линий.

Воздух поступает в установку и сжимается компрессором. Объем его уменьшается, а давление возрастает. Это показывает линия сжатия. Смесь воздуха и топлива сгорает в камере. В современных газотурбинных установках сгорание происходит непрерывно, а давление в камере поддерживается постоянным. Линия сгорания в этом случае — линия постоянного давления.

Из камеры сгорания газы поступают в сопловой аппарат, где расширяются, и совершают затем работу на лопатках турбины. Объем газов увеличивается, а давление уменьшается. Это показывает линия расширения.

Затем газы выбрасываются в атмосферу, температура их падает. Этому соответствует линия удаления продуктов сгорания.

Вернемся к нашей схеме и займемся первой ее частью — компрессором. Он изображен здесь отдельно



Фиг. 7. Осевой компрессор.

(фиг. 7). Но, может быть, художник перепутал рисунки — вместо компрессора по ошибке дал сюда многоступенчатую турбину?

В самом деле, здесь такие же диски с лопатками, как и у турбины. Это не ошибка, действительно, турбина и компрессор похожи как близнецы. Однако хотя они и похожи, задачи у них прямо противоположные.

Компрессор сжимает воздух, повышает его давление. В турбине газы расширяются, давление их уменьшается.

Компрессор нужно вращать. Это делает турбина. Турбина сама вращается за счет энергии поступающих на ее лопатки газов.

Как видим, турбокомпрессорная часть нашего двигателя — турбина и компрессор — состоит из похожих по устройству, но работающих по-разному частей. Разные в них работают и газы: компрессору приходится иметь

дело с чистым воздухом, а турбине — с продуктами сгорания топлива, разбавленными воздухом. Для турбины, где температура газов достигает  $650-900^{\circ}\text{C}$ , нужны самые прочные, самые жаростойкие стали. Для компрессора достаточно алюминиевого сплава или обычной стали.

Но не надо думать, что если в компрессоре нет таких высоких температур, то можно сделать его из такого алюминиевого сплава, из которого делают кастрюли. Компрессор, изготовленный из недостаточно прочного материала, разрывается на куски, как будто от удара гигантским молотом.

Почему это происходит? Попробуем ответить на этот вопрос.

Пусть мы имеем, например, диск компрессора диаметром 50 см, который вращается со скоростью в 10 000 об/мин. Эта скорость почти в три раза больше, чем у вала быстроходного двигателя внутреннего сгорания. Подсчет показывает, что центробежная сила, которая развивается при такой скорости вращения в крайних точках диска, равна приблизительно 30 т.

На каждый килограмм материала нашего диска при такой скорости вращения действует сила, в 30 тысяч раз превышающая его вес!

Значит, материал диска должен быть очень прочным, чтобы диск не разлетелся на куски при работе компрессора. С первыми компрессорами такие случаи бывали. При испытании одного компрессора для авиационного ГТД впервые запущенный новый ротор разорвался, прежде чем скорость вращения достигла 10 000 об/мин.

Пришлось столкнуться и еще с одной трудностью.

Говорят, что металл начинает уставать. Это не опечатка. После длительной работы при большом напряжении — а это как раз здесь и бывает — металл начинает менять свои свойства. И в результате таких изменений лопатки могут оторваться от диска и обломать все соседние. Двигатель выйдет из строя.

С большими трудностями пришлось столкнуться создателям ГТД. Работы хватило всем: и металлургам, и конструкторам, и технологам.

Иметь материал — это еще не все. Нужно его обрабатывать. Посмотрите, какую сложную форму имеет лопатка центробежного компрессора (фиг. 8).

Но такая форма — не прихоть конструктора: она результат точного расчета, подтвержденного опытами. Это наивыгоднейшая форма и отклониться от нее, значит ухудшить работу компрессора.

А что скажет технолог? Как сделать такую лопатку?

Первые компрессоры изготавливались самым простым способом, какой только можно себе представить. Каждую лопасть изгибали вручную молотком на болванке соответствующей формы. Сразу сделать лопатку таким способом не удавалось и потому каждую лопатку приходилось изгибать три—четыре раза, а после каждого изгиба металл отжигать — нагревать до 400—470° С, чтобы он сохранил необходимые механические качества.

Нетрудно себе представить, насколько длительным и сложным был такой способ. Самый совершенный двигатель — и самый несовершенный способ его изготовления!

Способ начали совершенствовать.

Совершенствовали как обработку самого материала, так и изготовление деталей компрессора.

Руки рабочего заменил пресс, а чтобы не приходилось прерывать работу, вытаскивать и отжигать детали, некоторые станки, обрабатывающие лопатки, приспособили для работы при высоких температурах.

Очередная трудность: лопатка должна быть изготовлена нужной формы весьма точно.

Попробуйте слегка толкнуть ротор компрессора авиационного ГТД, установленный на опорах. От малейшего толчка он сделает несколько десятков оборотов. Это значит, что он изготовлен очень точно: по весу и форме каждая лопатка отличается от другой не больше, чем на малую строго определенную величину.

Ротор компрессора после изготовления тщательно испытывается. В нем не должно быть ни малейшей трещины. Такую трещину не легко найти, и пришлось разработать даже специальные методы обнаруживания трещин. Так, например, испытываемую деталь погружают в ванну с раствором флюоресцирующего вещества: если на поверхности есть трещина и дефекты, то это вещество останется в них. При облучении детали ультрафиолетовыми лучами оно будет светиться и выдаст тайну местонахождения трещин.

Внутренние трещины выдают себя другими способами. Например, применяются своеобразные «локаторы», посылающие волны высокой частоты, которые отражаются от детали и дают изображение на экране «локатора». Если на пути волны встретится трещина или дефект, изображение на экране немедленно сообщит об этом, изменяя свою форму.

Можно было бы рассказать еще о многих подобных методах, но для нас важно другое, — все они дают возможность проверить, как изготовлен компрессор. А он должен быть изготовлен точно и без малейших дефектов. Техника газотурбостроения добилась здесь больших успехов, преодолела большие трудности.

Расскажем об одном эпизоде борьбы за советскую газовую турбину, который описал корреспондент ленинградской газеты, побывавший на Невском машиностроительном заводе имени Ленина<sup>1</sup>.

...На полотнищах ватмана и кальки видны, словно препарированные, детали будущей машины. Их много, этих белых и сиреневых листов, развешанных на стенах, сложенных аккуратными стопками, свернутых в трубки, распластанных на чертежных досках. Склонившись над ними, люди считают и пересчитывают что-то на листах бумаги, а затем выводят у полей проекта колонки многозначных чисел. Привычная обстановка конструкторского бюро крупного завода, рядовой, будничный день...

А между тем, мы присутствуем при рождении нового двигателя — газовой турбины...

Компрессор — сердце всей установки.

Создание его связано с большими трудностями.

Дело в том, что в компрессоре, где уплотненная масса сталкивается с потоками воздуха из атмосферы, легче возникают завихрения, ведущие к большим потерям энергии. Значит, лопатки компрессора должны быть иными, нежели в турбине.

Какими же?

Этот вопрос возник с первых же дней работы над компрессором.

И, надо заметить, это был один из многих вопросов, встававших перед людьми, которым предстояло создать проект первой у нас стационарной газовой турбины.

---

<sup>1</sup> А. Раскин, Энергия скорости, „Ленинградская правда“, 25 апреля 1947 г., № 97.

И получить лопатку компрессора было, пожалуй, самым трудным во всем деле подготовки проекта газотурбинного агрегата.

Да, лопатка в компрессоре должна быть иной, нежели в турбине. Законы аэро- и газодинамики подсказывали, что по своему профилю она должна быть винтообразной, подобно воздушному винту самолета...

Инженеры, рассчитывая найти подтверждение своим мыслям, обратились к архивам конструкторского бюро, где хранились проекты выпущенных заводом воздуходувок и судовых вентиляторов.

Они достали данные лабораторных исследований, проведенных заводом перед войной, и здесь столкнулись со знакомой уже проблемой преодоления завихрений, возникающих при столкновении обычных и уплотненных масс воздуха. Еще очень далеко было до решения всей задачи, но инженеры, по крайней мере, узнали о вариантах, которые сразу можно отбросить как явно неудачные.

Но и впереди было бесконечное количество вариантов. Из них нужно было выбрать всего несколько: наиболее приближенные к поставленным требованиям.

На ватмане появился чертеж со схемой сплошного потока без завихрений. Было точно рассчитано направление масс воздуха, которые захватывает работающая лопатка, спроектированная в виде винта непостоянного шага. Теория, опыт, наконец, интуиция, без которой все-таки не может быть никакой творческой работы, подсказывали, что ответ на вопрос найден.

Потом чертеж перешел к технологам и побывал в цехе, изготавлиющем турбинные лопатки.

И здесь возникла новая проблема. Лопатку можно сделать точно по присланному чертежу. Но... вручную. Ее профиль не поддавался механической обработке. А ведь только для одного компрессора необходимо две тысячи лопаток! Нельзя ли придать винту постоянный шаг? Тогда лопатка сможет быть обработана на станке.

Пришлось снова заняться подсчетами. Сомнений быть не могло: лопатка с постоянным углом поворота создавала воздушные потоки той же интенсивности и притом без завихрений. Оставалось выбрать материал.

Не нужно забывать, что каждый миллиметр лопатки действующего компрессора испытывает гигантскую силу давления.

Кажется, все. Но оказывается предстоит выяснить еще одну подробность...

Известно, что и по самому крепкому мосту запрещается ходить в ногу. От ритмичных, нечувствительных вначале для моста колебаний он может в конце-концов рухнуть. А здесь, в компрессоре, во время его работы не разлетятся ли в куски лопатки? Где, на каких оборотах могут возникнуть опасные зоны?

Инженеры должны были ответить на этот, теперь уже действительно последний, вопрос. Расчет на вибрацию следовало осуществить для всех вариантов — от 1 500 до 5 000 оборотов. Нет ли совпадения собственной частоты колебания лопатки с оборотами вала?

Эта работа заняла два месяца без малого. Теперь можно было отправлять чертежи в цех.

Так создавалась лишь одна деталь опытной газотурбинной установки...



О том, как работает компрессор, мы уже немного говорили в предыдущей главе, когда рассказывали о значении аэродинамики в развитии газовых турбин.

Чаще всего в ГТД применяются осевые компрессоры. Они сжимают воздух до давления в среднем 3—5 ат и выше. В некоторых двигателях оно доходит до 10—12 ат. Число дисков с лопатками — ступеней сжатия — достигает 20 и более.

Осевой компрессор может быть устроен и по другому: вместо отдельных дисков с лопатками, насаженными на общий вал, — ряды лопаток на одном барабане.

Ряд вращающихся лопаток, сжимающих воздух, чередуется с рядом неподвижных, выпрямляющих воздушный поток. Эти лопатки укреплены на крышке компрессора так, что ряд неподвижных лопаток разделяет два ряда подвижных.

В авиационных двигателях применяются и центробежные компрессоры.

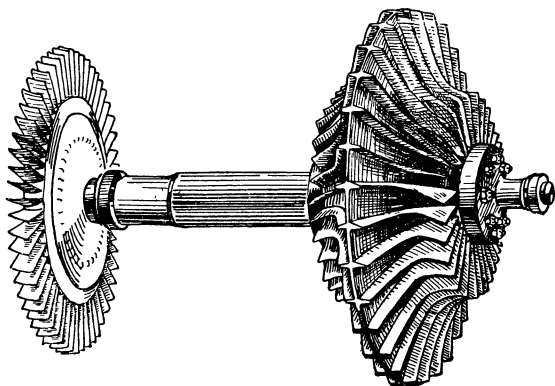
Такой компрессор может быть односторонним, с лопатками на одной стороне диска, или двухсторонним — на обоих его сторонах. Воздух тогда подается к ротору компрессора с двух сторон (фиг. 8).

У каждого из них есть свои достоинства и недостатки.

Центробежный компрессор по сравнению с осевым имеет больший диаметр, а осевой — большую длину. Центробежный компрессор проще и имеет меньший вес.

Возможен и двигатель с комбинированным компрессором: часть ступеней сжатия «центробежного» типа, часть — «осевого».

Компрессор выполняет в нашей схеме очень важную задачу — обеспечивает двигатель воздухом. А газотурбинному двигателю требуется большое количество возду-



Фиг. 8. Роторы центробежного компрессора (справа) и турбины.

ха. Если поршневому двигателю требуется на 1 кг топлива 15 кг воздуха, то авиационной газовой турбине — в 4 раза больше!

Воздух нужен газотурбинному двигателю не только для сгорания топлива. Если бы весь подаваемый компрессором воздух использовать для сгорания топлива, двигатель не стал бы работать.

На первый взгляд все кажется очень просто: воздух есть, достаточно впрыснуть в него топливо, воспламенить — и двигатель заработает.

При сгорании топлива в камере сгорания ГТД выделяется очень много тепла.

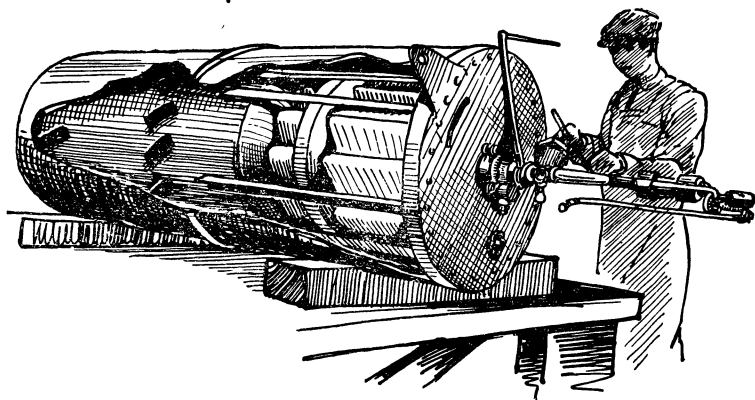
Чем больше выделится тепла, тем выше получится температура. Она может достигать почти до  $1800^{\circ}\text{C}$ .

Из каких бы сверхтугоплавких материалов ни была сделана турбина, она не выдержит такой огромной температуры.

Самые стойкие материалы турбины пока что выдерживают температуру не выше  $900^{\circ}\text{C}$ , и то в таких турбинах, которые рассчитаны на непродолжительный срок службы. Лопатка же современной стационарной газовой турбины выдерживает температуру не больше  $650^{\circ}\text{C}$ .

Поэтому нужно снизить температуру отходящих газов.

Теперь вы, наверное, догадываетесь, почему нельзя весь воздух из компрессора использовать для сгорания. Слишком много воздуха, — сгорание будет идти плохо,



Фиг. 9. Камера сгорания. Видна внутренняя (пламенная) труба с укрепленными на ней лопатками, служащими для лучшего перемешивания воздуха.

не выделится достаточного количества тепла. С другой стороны, воздух нужен для того, чтобы разбавить им слишком горячие газы, снизить их температуру до безопасной для турбины.

И потому поток воздуха из компрессора разделяется в камере сгорания на две ветви: одна, меньшая, идет для сгорания, другая — для снижения температуры газов.

Если двигаться от входа в двигатель к выходу по воздушно-газовому тракту, то температура возрастает. Чистый воздух засасывается компрессором, сжимаясь — разогревается. Но это не сравнить с тем, что происходит в камере сгорания. Тут уже не обойдешься алюминиевыми сплавами! Камера сгорания (фиг. 9) делается из прочной стали и обязательно охлаждается воздухом, снаружи и внутри.

Кстати, нужно заметить, что чаще всего в ГТД бывает не одна камера сгорания, а несколько, иногда даже полтора десятка, которые «опоясывают» двигатель.

Вместо многих отдельных камер сгорания в авиационных ГТД иногда применяют одну — кольцевую.

Каждая камера — двойная цилиндрическая труба, отдаленно напоминающая самовар. Внутренняя труба называется пламенной трубой. Она окружает пламя горящего топлива. Воздух в пламенную трубу попадает через ряд каналов или кольцевых щелей. В днище пламенной трубы установлены форсунки, впрыскивающие топливо.

Пламенная труба охлаждается воздухом, которого в пламенную трубу подается больше, чем нужно для сгорания топлива. Этот «избыточный» воздух охлаждает внутренность трубы.

Охлаждается труба и снаружи. Ведь она помещается внутри другой, наружной трубы, называемой воздушной камерой. Из кольцевого пространства между обеими трубами воздух и направляется в пламенную трубу.

Пламенная труба оказывается, таким образом, в «рубашке» из охлаждающего воздуха. У стенок температура не превышает поэтому примерно  $800^{\circ}\text{C}$ .

Металл приходится защищать не только от высокой температуры.

Горячие газы и кислород, которого немало в избыточном воздухе, могут разрушить нагретые стенки камеры. Для изготовления пламенных труб идет специальная жароупорная, химически стойкая сталь.

Нельзя забывать и то, что при нагревании металл расширяется. Если камеру сгорания закрепить с двух концов, то поломка неизбежна. Поэтому ее закрепляют только одним концом, а другой имеет возможность скользить, удлиняться.

Воздух в камере тщательно перемешивается с горячим. Раскаленные газы встречают струю впрыскиваемого топлива и зажигают его. Однажды зажженное топливо будет само продолжать гореть.

Продукты сгорания, выходящие из пламенной трубы, смешиваются с потоком воздуха из воздушной камеры и температура их понижается.

Для хорошей работы камеры необходимо распылить топливо форсунками, зажечь струю топлива, обеспечить устойчивое горение и перемешивание воздуха с газами.

Чтобы выработать удовлетворительно работающую конструкцию камеры сгорания, пришлось и приходится производить многочисленные и сложные исследования.

Вот, например, как изучали распыливание топлива. Жидкую частицу трудно измерить. Поэтому через распылительную форсунку разбрызгивали расплавленный парафин и затем собирали быстро затвердевавшие мельчайшие капельки парафина. Просеиванием разбивали частички на группы разных размеров. Таким путем приходилось определять размеры нескольких тысяч частиц, чтобы решить, как лучше подавать топливо в двигатель и как лучше распылять его.

При испытаниях камеры сгорания инженеры встретились с непонятными, на первый взгляд, явлениями. Сварной шов на камере после непродолжительной работы двигателя разрывался, как будто стенка была сделана не из прочной стали, а из жести.

Сначала думали, что в этом виновата сварка. Эту мысль, однако, скоро пришлось оставить: разрывы появлялись и там, где швов поблизости не было. Тогда решили сделать стенки потолще, но... аварии продолжались.

Когда стали внимательно исследовать места поломок, то заметили, что металл там «уставал», прочность его падала. Почему? Ответ на этот вопрос дали наблюдения за давлением воздуха, идущего из компрессора. Оно оказалось непостоянным: воздух пульсировал, давление его менялось много раз в секунду. Эти-то высокочастотные колебания давления и были причиной поломок. Когда воздушную камеру сделали из мягкой стали, лучше переносящей такие колебания, аварии прекратились, и срок службы камеры namного увеличился.

Тщательно, шаг за шагом изучают инженеры работу камеры сгорания. И если современные ГТД работают десятки и сотни часов, — этим могут гордиться, наряду с конструкторами, металлургами и инженеры — химики, физики, теплотехники, творцы «огненного дыхания» газовой турбины.

«Огненное дыхание» раскаленных газов движет турбину. Ее питают воздухом и газами компрессор и камера сгорания. Турбина, в свою очередь, приводит в движение компрессор и выполняет любую полезную работу, какую ей поручат, — вращает генератор электрического тока, пропеллер самолета, винт судна, колеса турбовоза.

Лопатки турбины все время находятся в потоке газов, нагретых до  $650\text{—}900^{\circ}\text{C}$ . Лопатка — наиболее ответственная деталь турбины.

Ведь каждая лопатка растягивается с силой, превосходящий ее вес в десятки тысяч раз. Да вдобавок она еще нагревается до высокой температуры. Лопатка может поэтому «поползти», удлиниться и довольно значительно. Тогда она заденет за кожух турбины, и авария неизбежна.

Даже камеру сгорания, где непрерывно бушует поток раскаленных газов, нельзя сравнить по условиям работы с турбиной. Тем более нельзя сравнивать с нею компрессор.

И тем не менее, их нужно сравнить с турбиной, но только не по отдельности, а вместе.

В турбине, как и в компрессоре, тоже развиваются центробежные силы. О том, какие они могут быть, мы уже знаем на примере компрессора. И в то же время, от действия горячих газов турбина нагревается.

Турбине приходится гораздо тяжелее, чем другим частям ГТД — вот какой можно сделать отсюда вывод. Значит, и материал для турбины должен быть особо прочным и притом сохранять прочность при высоких температурах.

Чтобы яснее себе представить, насколько трудной была эта задача, послушаем трех инженеров.

Инженер-металлург скажет нам: нужно, чтобы металл для турбины при высоких температурах не разрушался и не изменял своих свойств.

Инженер-технолог предъявит свои требования: нужно, чтобы металл для турбины можно было ковать, прокатывать, отливать, сваривать и обрабатывать на станках.

А инженер-конструктор потребует, чтобы этот самый металл выдерживал как можно более высокую температуру — чем выше эта температура, тем лучше работает двигатель.

Когда работа над материалами для газовых турбин еще только начиналась, существовали сплавы, выдерживающие температуру «всего» около  $500^{\circ}\text{C}$  и пригодные только для паровых турбин.

Дальнейшая работа над этими сплавами была по существу сражением за каждый лишний десяток градусов. Выше  $650^{\circ}\text{C}$  каждые несколько градусов уже значитель-

но укорачивали жизнь всех имевшихся сплавов. Правда, утилизационные турбины в авиационных компрессорах выдерживали большую температуру, но их жизнь коротка. А для стационарных газовых турбин долговечность — важнейшее требование. Срок их службы должен исчисляться десятками тысяч часов.

И поведение металлов стали исследовать при постепенно повышающейся температуре и больших центробежных нагрузках.

Перепробованы были всевозможные варианты различных добавок, которые могли придать сплавам нужные нам свойства. Металлурги создали жаропрочные сплавы для газовых турбин.

В настоящее время для изготовления лопаток применяются сплавы никеля и хрома, а также стали с добавками никеля, хрома и марганца.

Диски турбин, которым приходится работать в более легких условиях, изготавливаются из сталей, содержащих небольшие добавки хрома, марганца, никеля, молибдена.

Испробовались и другие материалы. Немцы пытались, например, из-за недостатка дефицитных материалов применять для лопаток керамические материалы — кварц, карборунд, глинозем.

Керамическая лопатка смогла бы выдержать значительно более высокую температуру, чем металлическая. Однако, прочную керамическую лопатку, выдерживающую огромные центробежные нагрузки, создать нелегко. Задача эта сложная, и пока дальше опытов дело не пошло.

Для лопаток турбин пытались, например, использовать даже армированный фарфор (с металлической решеткой внутри для увеличения прочности, подобно железобетону).

Не все шло гладко. Нередко случались и аварии — обламывались лопатки, разрушались диски, как будто в них стреляли из пушки. Поверхность лопаток делалась шероховатой, образовывались трещины.

Но упорная работа дала свои результаты. Этой работе, как и всем другим работам по созданию ГТД, и обязан новый тепловой двигатель своим существованием.

Теперь, как мы это уже однажды делали, представим слово технологам.

Как сделать лопатку? И не просто сделать, а сделать точно и быстро, придать лопатке нужную форму и высокую чистоту поверхности. Вот как выглядит типичная лопатка турбины: это изогнутая поверхность с хвостовиком. Этим хвостовиком лопатка вставляется в паз на диске (фиг. 10).

Такая форма нужна для того, чтобы газовая струя плавно обтекала лопатку. Так как при этом струя еще и поворачивает, то возникает сила, действующая на лопатку и движущая турбину.

Для обработки лопаток сконструировали специальные станки: существовавшие ранее не удовлетворяли инженеров, и от них пришлось отказаться. Новые станки позволили обрабатывать лопатки разных сложных форм и притом значительно быстрее.

Но на этом не остановились. Лопатки изготовляют штамповкой и отливкой.

Как ни странно это звучит, но при постройке газовых турбин, т. е. в тяжелом машиностроении, пригодился

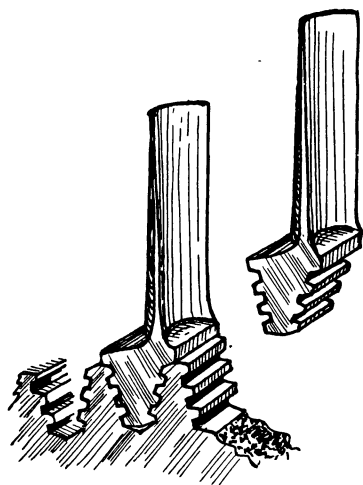
опыт «сверхлегкого машиностроения» — ювелирной промышленности.

Мелкие ювелирные изделия изготавливались прецизионным литьем — литьем высшей точности. Этим способом можно изготовить детали сложной формы с гладкой поверхностью. Их можно изготовить из таких сплавов, которые трудно или совсем невозможно отковать или обработать на станке.

Восковую модель лопатки помещают в специальный формовочный материал и нагревают. Воск плавится, и вытекает, а его место заполняют жидким сплавом. Сплав застывает — и лопатка готова.

Как проверить, насколько правильно она изготовлена?

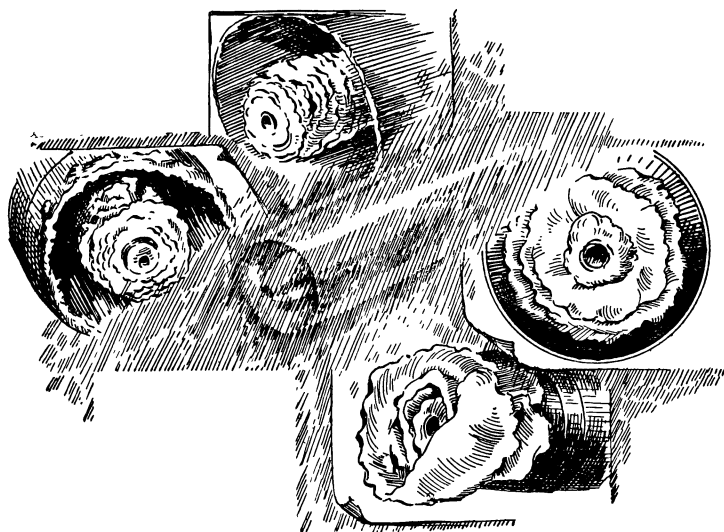
Расскажем об одном из способов. На помощь здесь призвана оптика, своеобразное «кино».



Фиг. 10. Лопатка турбины.

На экране вычерчена лопатка в профиль. Настоящую лопатку ощупывают наконечники,двигающиеся один сверху, другой снизу лопатки. Тени их видны на экране. И если наконечники точно идут по изображению лопатки на экране — лопатка сделана правильно.

Теперь надо изготовить диск турбины. Для дисков тоже разработаны жаропрочные сплавы. Из такого сплава мы и изготовим наш диск.



Фиг. 11. Испытание авиационного газотурбинного двигателя в условиях обледенения.  
Слева показаны ледяные зубья и корона, справа—роза и тюльпан.

Диск и лопатки надо соединить между собой. Их можно соединить, например, «елочкой», как показано на фиг. 10.

Хвостовик лопатки делают с трапецевидными зубцами, а в ободке диска турбины делают вырезы такой же формы, так что лопатка плотно входит в диск. Можно хвостовик сделать и другой формы, например цилиндрической.

Теперь нужно укрепить направляющие лопатки на кожухе турбины. Эти лопатки неподвижны и размещены между каждой парой ступеней турбины. Есть они и в осевом компрессоре. Их назначение — выпрямить поток воз-

духа или газа при его движении от ступени к ступени. Изготавливаются они так же, как и рабочие лопатки турбины.

Турбина готова.

Смонтируем компрессор, камеры сгорания и все вспомогательные механизмы, и можно приступить к испытаниям.

Как же производятся испытания газотурбинных двигателей?

Мы в испытательной лаборатории. Помещение, в котором мы находимся, — кабина наблюдения, напоминающая дот. Это железобетонная труба, с полуметровыми стенками, со звуконепроницаемой прослойкой, с двойными смотровыми окнами из бронестекла. Сюда не доносится ни один звук. Закрытые переходы соединяют кабину с машинными залами и другими помещениями лаборатории. Это нужно для того, чтобы защитить нас от шума и обезопасить от возможного взрыва или пожара. Из кабины наблюдения мы управляем на расстоянии нашими установками, а приборы показывают все, что происходит в машинном зале.

Обороты, давления, температуры, скорости — все это мы узнаем, не выходя из нашей железобетонной крепости.

На силовой станции лаборатории имеется несколько мощных паровых турбин, которых хватило бы для целого миноносца.

Эти турбины вращают компрессоры, подающие сжатый воздух, и те компрессоры, которые надо испытывать.

На прочном железобетонном фундаменте установлена турбина. Сжатый воздух идет в камеру сгорания, и горячие газы поступают в турбину. Из турбины выхлопные газы отводят по круто изогнутой трубе, чтобы быстрее затормозить поток.

Турбины с очень большим числом оборотов — свыше 30 000 — испытывают на разрушение в толстостенных стальных камерах. Растут обороты... Диск разлетается на куски. Кусок ударяется в стенку камеры и замыкает контакт. В тот же момент включается яркая лампа и кинокамера, приспособленная для съемки с большой скоростью. На снимках видно, где началось разрушение, какое оно. Счетчик показывает, сколько оборотов выдержала турбина.

Отдельно испытываются на разрушение и лопатки турбин. Лопатку помещают между двумя электромагнитами. Посылая ток то в один, то в другой магнит, лопатку можно заставить колебаться, вибрировать. Каждый из магнитов будет попеременно ее притягивать, пока от быстрой вибрации она не разрушится.

В лаборатории испытания камер сгорания воздухоудовки подают воздух, а мощные насосы — топливо из подземного хранилища. Точные приборы отмечают расход топлива и бдительно следят за поведением пламени. Затухает пламя, и они автоматически выключают подачу топлива, чтобы случайно не взорвались остатки его в камере.

Испытываются и другие части газотурбинного двигателя — подшипники, регуляторы, топливная и масляная аппаратура.

Испытывается и весь двигатель в целом. Его устанавливают на испытательном стенде. Две-три сотни измерений одновременно приходится производить при работе двигателя.

Авиационный двигатель можно заставить работать на разных «высотах» в «высотной» камере, откуда постепенно выкачивается воздух.

Можно заставить двигатель работать во влажном и сухом воздухе, чистом и засоренном, теплом и холодном.

Все это нужно для того, чтобы знать, как поведет себя двигатель в самых различных условиях, где ему придется работать.

Но вот двигатель испытан — в целом и по частям, устранены все неполадки.

Ему остается сдать еще один серьезный экзамен.

Двигатель работает несколько часов подряд. Он работает так, как работал бы, скажем, на настоящем самолете: «набирает высоту», «летит», «снижается», дает самую малую и самую большую мощность.

Устраивают и летные испытания авиационных двигателей на «летающих лабораториях» — специально оборудованных самолетах.

Затем двигатель полностью разбирают и осматривают, изучают «отчет» о его работе — записи приборов.

И если все в порядке, он получает «путевку в жизнь». Еще один двигатель встал в строй.

При испытаниях первых газотурбинных двигателей приходилось сталкиваться с различными неожиданностями.

Вот что происходило, например, при испытании одного из первых авиационных ГТД.

Инженеры встретились с неприятной неожиданностью: двигатель не слушался управления. Турбина давала лишь половину необходимого числа оборотов. Оказалось, что форсунки плохо подавали топливо: пружина у форсунки перегревалась и переставала пружинить. Топливо плохо сгорало. Когда подача топлива увеличивалась, то топливо не сгорало полностью там, где нужно, — в камере сгорания, перед турбиной, пламя прорывалось на лопатки турбины. После переделки камеры сгорания турбина прибавила обороты, но до нужного числа оборотов было еще далеко.

Неприятности со сгоранием продолжались и в следующем опытном двигателе. Лопатки турбины разрушались из-за чрезмерно высокой температуры газа и нагрузки от вращения. Различные камеры сгорания начали испытывать отдельно, пока не получили хороших результатов. Но стоило поставить эти испытанные камеры на двигатель, — и снова начинались неприятности. По несколько раз приходилось переделывать камеры, улучшать подачу топлива.

Другой трудностью была плохая работа компрессора. Компрессор упорно не давал нужного давления. Попробовали изменить его конструкцию... и неожиданно ухудшилось сгорание.

Однажды при испытании компрессора лопатки начали тереться о кожух, и часть из них поломалась. За ними сорвались все остальные лопатки, и за тридцать секунд были уничтожены плоды восемнадцати месяцев труда.

Наконец, третий опытный двигатель с переделанным компрессором прибавил еще тысячу оборотов. Но тут появилась следующая трудность. Оказалось, что лопатки турбины при ее работе расшатывались и выпадали из диска. Пришлось придумать другой способ крепления их к диску.

Когда обнаруженные недостатки были устранены, снова испытали весь двигатель в целом... и снова потерпели неудачу.

И лишь после многих новых переделок и испытаний двигатель начал работать как следует<sup>1</sup>.

При испытаниях нередко происходили интересные эпизоды.

Вот что получилось, например, когда испытывали работу авиационного газотурбинного двигателя в зимних условиях. «Зиму» создавали искусственно, впрыскивая в двигатель воду при низкой температуре. Двигатель обрастал льдом. На его входной части — там, где в обтекателе помещается небольшой пусковой моторчик, вырастали причудливые ледяные фигуры и цветы (фиг. 11). На рисунке показаны ледяные зубья, которые образовались в начале работы. Часть из них обламывалась и падала в компрессор, но, несмотря на это, лед нарастал и нарастал, пока, наконец, не приобрел формы короны. В другой раз на двигателе выросла красивая ледяная роза. После часа работы роза превратилась в ледяной тюльпан. Эти ледяные «цветы» оказались далеко не безобидными. Во время одного из испытаний осколок «тюльпана» попал в компрессор, и двигатель потерпел аварию. В другой раз кусок льда срезал лопатки компрессора.

Такие испытания помогли найти способы борьбы с обледенением двигателя зимой.

...Спрашивается, например, что произойдет, если в компрессор попадет воздух с песком? Никто не знал, что при этом получится и не мог ответить на этот вопрос. К двигателю на небольшом ленточном транспортере подавали песок. После испытаний разобрали двигатель и нашли расплавленный песок в камерах сгорания и в турбине. Это показало, насколько засоренный песком воздух опасен для двигателя. Для очистки воздуха на входное отверстие двигателя ставят теперь предохранительные сетки, а взлетные полосы аэродромов тщательно поливают водой.

При других испытаниях исследовали влияние впрыскивания охладителя — аммиака — в двигатель, чтобы уменьшить перегрев.

— Эти испытания не были лишены волнующих моментов, — рассказывает инженер, присутствовавший на испытаниях.

---

<sup>1</sup> Этот эпизод приведен в книге Б. Ляпунова, «Ракета», Детгиз, 1950, стр. 92—93.

— Перед тем, как были проведены испытания по впрыскиванию аммиака, было установлено, что аммиак сгорит в камере сгорания. С учетом того, что аммиак летуч, баллоны были установлены снаружи испытательной станции, все присутствующие при испытаниях лица были снабжены противогазами и никто не оставался при испытаниях в помещении. Электрический световой сигнал, расположенный у техника, управляющего двигателем, связывал его с другим техником, находившимся у баллонов, и сигнализировал ему о выпуске аммиака. К сожалению, когда первый техник включил сигнал, клапан выпуска аммиака «заело», его не удалось открыть в то же самое время. Стоявшие у двигателя решили, что аммиак входит в двигатель, но ничто от этого не меняется. В этот момент клапан подачи аммиака внезапно открылся, и значительно больше, чем рассчитывали. С большим шумом, напоминающим взрыв, двигатель разогнался примерно от 15 000 до 20 000 об. мин. Наибольшие допустимые обороты были 17 000. Ртуть была выброшена из больших манометров, и некоторые из них серьезно пострадали. Техник у двигателя, однако, понял случившееся и очень быстро остановил двигатель.

Повреждения двигателя не произошло, но впоследствии выяснилось, что лопатки турбины и диск значительно вытянулись.

После некоторых усилий испытания проводились в более нормальных условиях...<sup>1</sup>.

Не надо, конечно, думать, что с каждой турбиной, которая проектируется и строится, обязательно случаются неприятности, подобные тем, какие мы описывали.

Мы привели примеры и иллюстрации из практики мирового и отечественного турбостроения, чтобы показать, какая упорная борьба велась и ведется за создание новых конструкций газовых турбин инженерами наших дней.

Мы рассказали подробно о препятствиях, которые стоят на пути создания нового двигателя — газовой турбины, чтобы показать, что новая техника рождается в борьбе с трудностями, что она требует глубоких и разнообразных знаний, настойчивости, упорного труда.

---

<sup>1</sup> „Развитие газовых турбин“, Сборник статей, 1947, стр 95—96.

Простейшая схема ГТД, которую мы с вами составили, состоит из компрессора, камеры сгорания и турбины. Это основные части газотурбинной установки. К ним нужно еще, конечно, добавить устройства для питания двигателя топливом и смазкой, а также механизмы управления и приборы контроля за его работой.

Но вот вопрос: как будет работать двигатель такой простейшей схемы?

Дело в том, что всякий двигатель буквально выбрасывает на ветер тепло. Тепло, для получения которого расходуется драгоценное топливо, теряется с уходящими выхлопными газами, рассеивается в воздух через стенки, словом, везде, где только можно, оно стремится уйти бесполезно. Вот как используется тепло в обычном поршневом моторе: в полезную работу переходит в лучшем случае 38%. Все остальное пропадает.

В прямой связи с этим печальным фактом стоит и коэффициент полезного действия (к. п. д.) двигателя<sup>1</sup>. Значения к. п. д. для разных типов двигателей таковы: установка с паровой машиной 13—18%, паровая турбинная установка 23—32%, двигатель внутреннего сгорания 18—28%, дизель 30—38%, газотурбинная установка 20% (фиг. 1).

Невероятная вещь! Газотурбинный двигатель, который мы с самого начала отрекомендовали как наиболее экономичный, т. е. имеющий самый высокий к. п. д. среди всех тепловых двигателей, совсем не самый экономичный! Его к. п. д. ниже, чем у паровой турбины, а за дизелем ему и не угнаться.

В чем же дело? Неужели я вас обманывал?

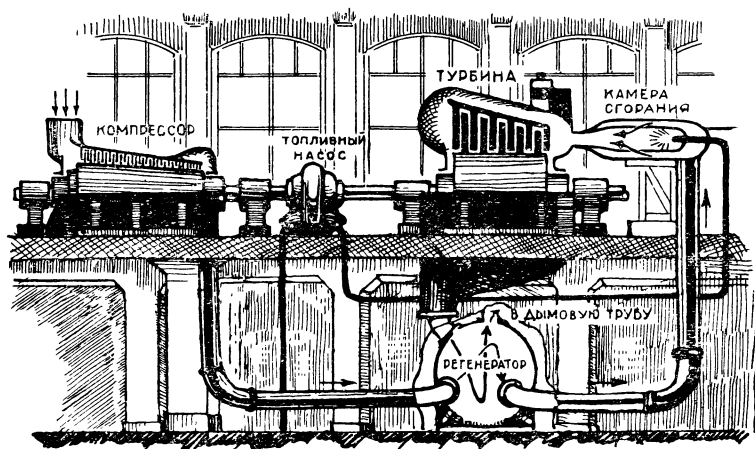
Нет, все верно. Действительно, к. п. д. газовой турбины ниже, чем у ее предшественников — паровой турбины и двигателя внутреннего сгорания. Но это верно только

---

<sup>1</sup> Коэффициент полезного действия характеризует совершенство машины. Существует несколько к. п. д. газотурбинного двигателя; каждая из его основных частей имеет свой к. п. д. Мы пользуемся здесь понятием полного к. п. д. всего двигателя в целом. Он равен отношению тепла, превращенного в полезную работу (вращение генератора электрического тока, винта судна, пропеллера самолета и др.), ко всему теплу, полученному при сгорании топлива в двигателе.

для газовой турбины простейшей схемы, какую мы с вами составили. Поэтому эта схема редко и применяется. Она хороша только там, где мало воды и с расходом топлива можно не считаться.

Газы, отработавшие в турбине, имеют еще высокую температуру. И это тепло вместе с выхлопными газами выбрасывается в атмосферу. Им можно воспользоваться для подогрева воздуха, подаваемого в камеру сгорания.



Фиг. 12. Схема ГТД с регенератором.

Подогретый воздух не будет нуждаться в затрате тепла, полученного от сгорания топлива. Выгода — экономия топлива, лучшее использование тепла, более высокий к. п. д.

Как и многие другие идеи, относящиеся к газовым турбинам, эта идея не нова, и о ней мы уже упоминали, рассказывая историю газовой турбины.

Итак, регенератор или, иначе, теплообменник — вот что в первую очередь мы должны добавить в нашу схему (фиг. 12).

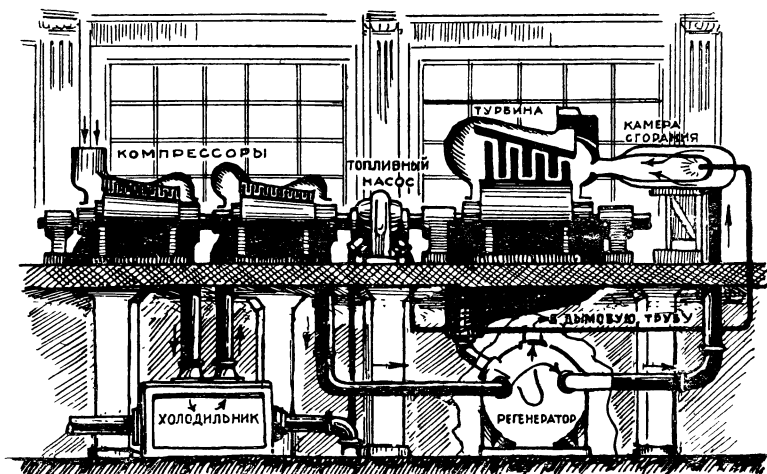
Название «теплообменник» это устройство получило потому, что в нем происходит обмен или передача тепла от нагретых газов более холодному воздуху. По трубкам проходит воздух, а горячие газы омывают их, отдавая воздуху свое тепло.

Если к. п. д. простой установки, без регенератора был, например, 20 %, то с регенератором он может дости-

гать 26%. Выгода ощутительная! И поэтому регенератор стал важной составной частью ГТД. Его применяют даже в авиационных газовых турбинах с винтом, хотя он и дает лишний вес.

Есть и другие пути повышения коэффициента полезного действия.

Затрата мощности на сжатие воздуха в компрессоре сильно зависит от температуры всасываемого воздуха. Она уменьшается с понижением этой температуры.



Фиг. 13. Схема ГТД с регенератором и промежуточным охлаждением.

По этой же причине повышает экономичность турбины промежуточное охлаждение воздуха водою на пути между компрессорами, когда их бывает несколько (фиг. 13).

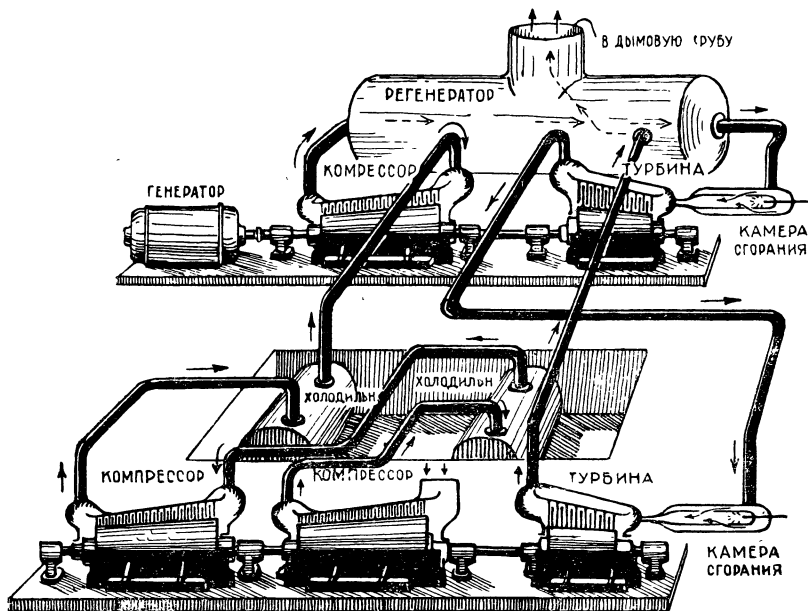
По сравнению с предыдущей схемой — с регенератором — коэффициент полезного действия получается равным 29%.

Выходящие из турбины газы уносят с собой тепло, но их температура недостаточна, чтобы они снова могли работать в турбине. Подогревая газы в отдельной камере сгорания, мы можем повысить их температуру, а затем поставить еще одну турбину и использовать в ней энергию газов (фиг. 14). Одну из турбин можно заставить вращать компрессор, а другую — выполнять полезную работу.

Такая схема дает к. п. д. уже около 32%.

И тогда в нашу диаграмму коэффициентов полезного действия (фиг. 1) придется внести существенную поправку: ГТД такой схемы приближается к дизелю — на первое место!

Схема наша усложнилась — вытянулась не только в переносном, но и в буквальном смысле. Вместо трех



Фиг. 14. Схема ГТД с регенератором, промежуточным охлаждением и промежуточным подогревом.

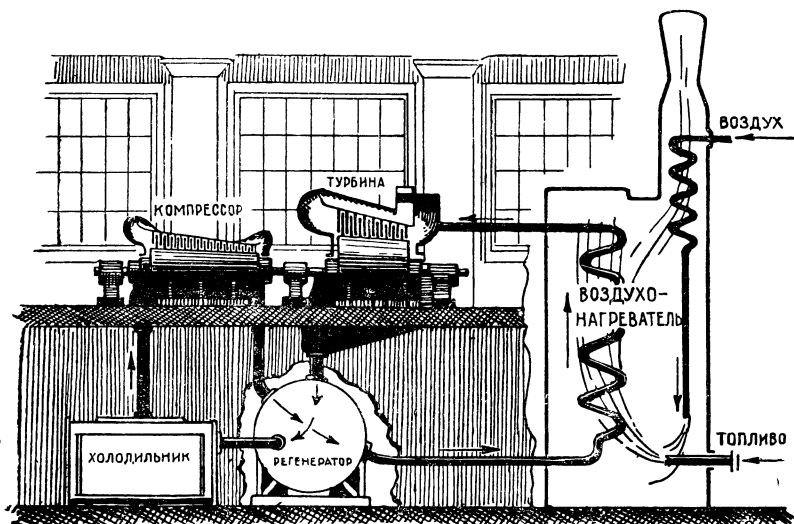
основных частей в ней стало 6 частей. Зато к. п. д. повысился более, чем в полтора раза.

Можно добиться при дальнейшем усовершенствовании установки и работе с большими температурами еще большего коэффициента полезного действия. Если удастся повысить температуру на входе в турбину с  $650^{\circ}$  до  $800^{\circ}\text{C}$ , то можно будет получить к. п. д. 36%.

До сих пор мы говорили о газотурбинной установке незамкнутого типа: газы, отработавшие в такой турбине, выбрасываются в атмосферу. Но возможна газовая турбина и другого — замкнутого — типа.

Вот как она работает.

Газ, например воздух, сжимается компрессором, подогревается в подогревателе и, отработав в турбине, охлаждается в регенераторе и холодильнике. Затем все начинается сначала. Установка изолирована, и газ все время циркулирует под давлением по замкнутому пути



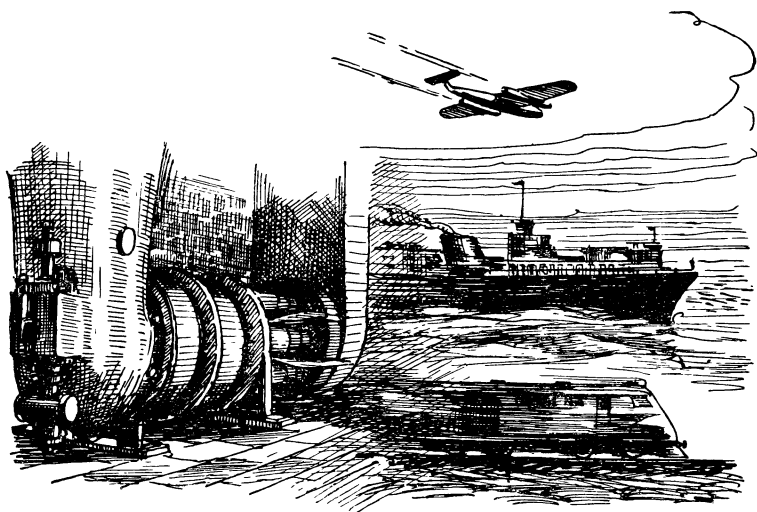
Фиг. 15. Схема ГТД замкнутого типа.

(фиг. 15). Как видим, в такой турбине газ не теряется во время ее работы.

Турбине замкнутого типа предстоит очень широкое будущее. Это будет, вероятно, самая мощная из всех газовых турбин.

Из физики известно, что объем газа при постоянной температуре обратно пропорционален давлению. При десятикратном увеличении давления объем уменьшится в 10 раз. Поэтому размеры турбины и компрессора уменьшаются, а в то же время мощность ее может быть очень большой. Сейчас только паровая турбина может дать мощность в 100 000 квт. В будущем такую мощность дадут и газовые турбины замкнутого типа.

Но здесь мы забежали уже в будущее газовой турбины. О нем мы и будем говорить в следующей главе.



### *3. На земле, в небесах и на море*

Авиация была первой отраслью техники, в которой стала широко применяться газовая турбина. Если вспомнить про небольшой удельный вес и размеры ГТД, то будет понятно, почему газотурбинный двигатель становится теперь таким же основным двигателем для авиации, как и поршневой мотор.

...Несколько лет тому назад, до войны, на одном из морских аэродромов готовились к рекордному полету на скорость. На гидросамолет поставили мотор невиданной для того времени мощности. Затем с самолета сняли все лишнее — вооружение, различное оборудование и прочее, словом, все, что не было нужно для рекордного полета. По сути дела, самолет превратили в «летающий мотор». И все же огромной мощности мотора хватило для того, чтобы развить скорость только около 750 км в час. Это был облегченный до предела самолет, специально приспособленный, гоночный, с мощным мотором, который после рекордного полета уже больше ни на что не годился.

...Это было совсем недавно, уже после войны. Обыкновенный серийный самолет, с которого ничего не снимали, с вооружением, оборудованием, грузом, но с газо-

турбинным двигателем установил рекорд скорости около 1 000 км в час. Сейчас скорости реактивных самолетов перешли за 1 000 км в час.

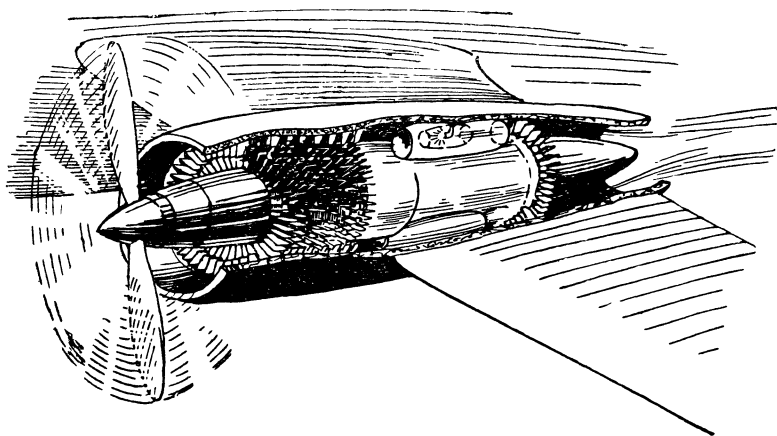
Повышение скорости — вот что, в первую очередь, дал ГТД самолету.

\* \*

\*

Что же представляет собой авиационный газотурбинный реактивный двигатель, который открыл новую главу в истории авиации?

Газовая турбина на электростанции вращает генератор электрического тока.



Фиг. 16. Схема турбовинтового двигателя (ТВД).

Газовая турбина на самолете вращает воздушный винт. Отсюда и название такого двигателя — турбовинтовой (ТВД).

Как и всякий газотурбинный двигатель, он имеет компрессор, камеру сгорания, турбину и может иметь регенератор (на самолетах, предназначенных для дальних перелетов). Но есть в нем часть, с которой мы еще не встречались.

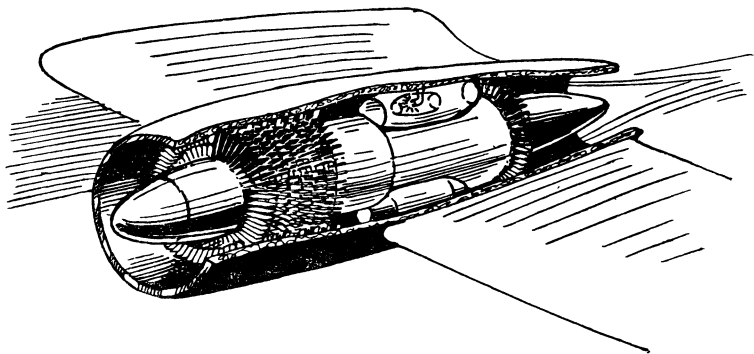
Если газы после турбины заставить вытекать через выхлопную трубу — сопло, то возникнет реактивная тяга, отдача, толкающая самолет вперед.

В нашей схеме появится новая часть — сопло (фиг. 16).

Распределять вырабатываемую двигателем мощность между воздушным винтом и соплом можно по разному.

На нескоростных самолетах на вращение винта тратится большая часть мощности газовой турбины. Наоборот, на скоростных самолетах на создание реактивной тяги тратится больше мощности.

ТВД служит как бы переходной ступенью к чисто реактивному двигателю, не имеющему винта и создающему только реактивную тягу. Перейти к этому двига-



Фиг. 17. Схема газотурбинного реактивного двигателя (ГТРД).

телю нам с вами очень просто. Посмотрите на схему (фиг. 17).

Как работает такой газотурбинный реактивный двигатель (ГТРД)?

Так как самолет летит с большой скоростью, то на входе в двигатель происходит повышение давления воздуха. Дальнейшее его сжатие идет в компрессоре. Турбина вращает компрессор. Газы, пройдя турбину, вытекают через сопло. Создаваемая ими реактивная тяга движет самолет.

Для увеличения тяги газотурбинного реактивного двигателя можно применять различные способы.

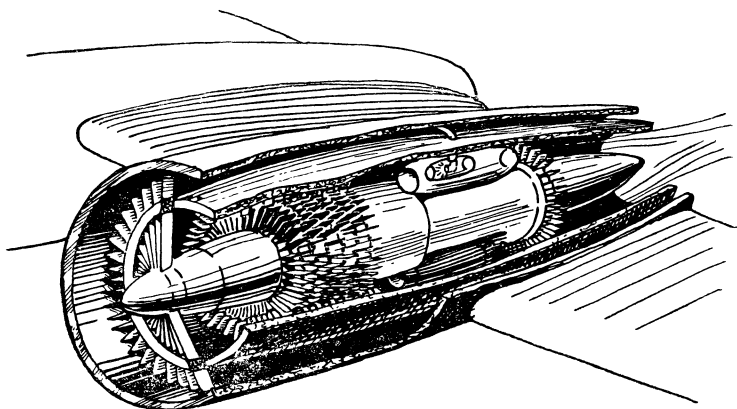
Вернемся ненадолго к той схеме, с которой мы начали — к схеме ТВД.

Заменим в ней «наружный» винт — пропеллер самолета — «внутренним» воздушным винтом — вентилятором. Поместим его в кольцевом канале, окружающем двигатель.

Мы получим тогда двухконтурный ГТРД. Первым основным контуром двигателя является компрессор, камера

сгорания, турбина и сопло. Вторым, дополнительным, контуром, служит кольцевой канал. Воздух, попадающий в канал, с силой отбрасывается из двигателя вентилятором параллельно основному потоку продуктов сгорания.

Схема двухконтурного ГТРД представлена на фиг. 18. Реактивная сила, возникающая при истечении



Фиг. 18. Схема двухконтурного ГТРД.

воздушного потока, складывается с реактивной силой, создаваемой потоком вытекающих газов. Поэтому добавление второго контура увеличивает тягу. Однако это дополнителный вес и увеличение габаритов двигателя.

Другим способом увеличения тяги является повышение температуры газа на входе в турбину.

Но без вреда для двигателя увеличивать температуру можно лишь немного и на короткое время. А между тем, повышение температуры газов перед турбиной позволило бы значительно увеличить тягу.

Для этого нужно изыскивать новые жароупорные сплавы.

В то же время можно заставить и старые материалы служить по новому, выдерживать более высокие температуры. Для этого нужно охлаждать турбину.

Лопатки можно устроить полыми и через них пропускать поток охлаждающего воздуха.

Охлаждающий воздух подводится к диску турбины, омывает его с двух сторон, а затем поступает внутрь.

лопаток через отверстия у их основания и, пройдя через лопатку, выходит сверху. Такие лопатки изготавливать, конечно, сложнее, чем сплошные. При опытах удавалось повысить таким образом допустимую температуру газов до  $1000^{\circ}\text{C}$  и более.

Сложнее охлаждение лопаток жидкостью.

Можно применить газовое охлаждение, создавая защитную газовую пленку со стороны нагреваемой поверхности лопатки. Лопатка изготавливается из пористого материала, полученного спеканием металлической пудры. Газообразный водород или азот под давлением вытесняется на поверхность лопатки и защищает ее от перегрева.

На бумаге все это выглядит, конечно, несравненно проще, чем на деле. Пока что применялось лишь воздушное охлаждение лопаток авиационных газотурбинных двигателей. Воздухом охлаждаются также лопатки соплового аппарата, подшипники и диск турбины.

Но мы рассказали и о других возможных способах, чтобы показать, какими путями идет мысль конструкторов, сколько изобретательности приходится вкладывать в создание новых двигателей, какими разнообразными, порой хитроумными путями приходится идти. Опыты и расчеты, расчеты и опыты — вот основной путь, каким бы путем мы здесь ни шли.

\*   \*  
\*

Бывают случаи, когда от двигателя самолета требуется увеличенная тяга — на взлете, при маневрах в полете и т. д. Тогда нужно на короткое время повысить тягу, как говорят, форсировать ее.

Как же это сделать?

Об одном способе мы уже упоминали — это повышение температуры газа перед турбиной. Способ этот, однако, надо применять очень осторожно, иначе можно повредить лопатки.

Нельзя ли избавить турбину от такой опасности?

Можно. Газовый поток, идущий через турбину, сильно разбавлен воздухом и в нем много кислорода. Если в поток, прошедший турбину, впрыснуть топливо, то этот воздух способен будет поддерживать горение.

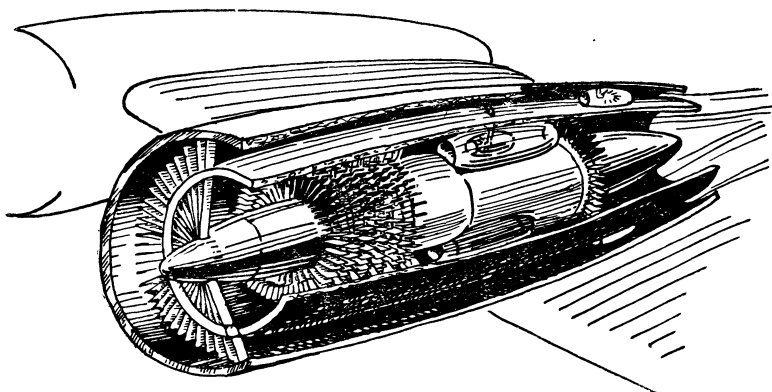
Дополнительный подогрев увеличивает энергию вытекающих газов, повышает скорость их истечения из сопла

и, тем самым, реактивную тягу. Для этого дополнительно сжигается топливо в специальной камере, расположенной за турбиной. Конструкция двигателя при этом, правда, усложняется, но зато турбина бывает избавлена от опасной температуры.

Схему двигателя с подогревом в отдельной камере, называемой форсажной, мы видим на фиг. 19.

Другим способом повышения тяги авиационного газотурбинного двигателя является «мокрое» сжатие воздуха в компрессоре.

У входа в компрессор впрыскивается жидкость (например, вода, аммиак или спирт), которая, испаряясь, от-



Фиг. 19. Схема ГТРД с форсажной камерой.

нимает у воздуха тепло. Охлажденный воздух занимает меньший объем, чем нагретый.

Поэтому при «мокроем» сжатии при той же затрате мощности на вращение компрессора воздух сжимается сильнее. Давление газов перед турбиной повышается. Это приводит к повышению скорости истечения, а, значит, и тяги.

Эти способы повышения тяги начинают применяться в авиационной технике.

\* \*

\*

Авиационные газовые турбины строятся теперь различных габаритов, назначения и веса. Имеются, например, маломощные двигатели с центробежным компрессором и одноступенчатой газовой турбиной, максимальный

диаметр которых составляет всего лишь немногим больше полуметра. Нормальное число оборотов такого двигателя доходит до 36 000 в минуту. Такой двигатель особенно подходит для легких самолетов. Имеются в то же время газотурбинные двигатели с максимальным диаметром почти в полтора метра, развивающие большую тягу и предназначенные для тяжелых транспортных самолетов.

Управление авиационным газотурбинным двигателем осуществляется с помощью рычага — сектора газа.

Для запуска газотурбинного двигателя необходимо раскрутить турбину до определенного числа оборотов. Чаще всего для этого применяют вспомогательный мотор.

Особенностью реактивного двигателя пока что остается все же высокий, по сравнению с поршневым мотором, расход топлива. Поэтому реактивный самолет должен иметь большой запас топлива.

Но в то же время газотурбинный авиационный двигатель работает на менее дефицитных топливах, чем бензин, применяемый для поршневых двигателей (керосин, соляровое масло и др.). Как мы говорили, авиационный газотурбинный двигатель мощнее и меньше по размерам, чем поршневой мотор.

Отсутствие вента и кривошипно-шатунного механизма — важное преимущество газовой турбины перед авиационным поршневым двигателем.

Газотурбинный двигатель работает ровно, без толчков. Так же плавно мог бы работать поршневой двигатель, имея лишь 100 цилиндров!

Вот что рассказывают те, кому приходилось летать на самолете с газотурбинным реактивным двигателем.

«Какой удивительный покой! Ни тряски, ни шума, столь типичных для поршневых самолетов, оглушающих ревом и гулом своих моторов. Какая лабораторная чистота в кабинах...

Холмы, овраги, дороги, черная масса лесов — все сливается и с неудержимой быстротой, теряя свои очертания, несется под крыльями. Дух захватывает от такой скорости...»

Простота конструкции, меньший вес и габариты выгодно отличают авиационную газовую турбину от поршневого двигателя.

Сравним два авиационных двигателя: поршневой и газотурбинный реактивный.

Удельный вес лучших поршневых моторов достигает примерно 0,4 кг на лошадиную силу. Удельный вес ГТРД — всего лишь около 0,1 кг.

Тяга поршневой винтомоторной установки с ростом скорости полета сначала увеличивается, а затем начинает падать, так как ухудшается работа воздушного винта.

Тяга же ГТРД, наоборот, на больших скоростях возрастает.

Газотурбинный воздушно-реактивный двигатель<sup>1</sup> — двигатель не сверхвысотный. В нем, также как и в обычном поршневом моторе, используется атмосферный воздух для сжигания топлива. Поэтому и потолок самолета с этим двигателем ограничен. Можно предполагать, что потолок такого самолета составит около 20 км, т. е. столько же, сколько и для самолета с обычным поршневым двигателем.

«Сверхвысотным» двигателем в авиации является лишь ракетный двигатель на жидком топливе. Он не нуждается в кислороде из атмосферы<sup>2</sup>.

Но, несмотря на то, что газотурбинный двигатель не может дать большого повышения ныне существующего потолка самолетов, этот двигатель, создающий большие скорости и мощности, становится основным двигателем в авиации. Значит ли это, однако, что авиационная газовая турбина полностью вытеснит поршневой мотор?

Конечно, нет. Принцип — каждому двигателю свое место — действует и здесь.

Поршневой мотор будет применяться там, где нужны небольшие скорости.

Турбовинтовой двигатель — это двигатель для транспортных и пассажирских самолетов, рассчитанных на длительные перелеты.

Газотурбинный реактивный двигатель нужен для полетов с большими скоростями.

---

<sup>1</sup> Газотурбинный реактивный двигатель относится к классу воздушно-реактивных двигателей, т. е. таких реактивных двигателей, в которых для сгорания горючего используется кислород из воздуха.

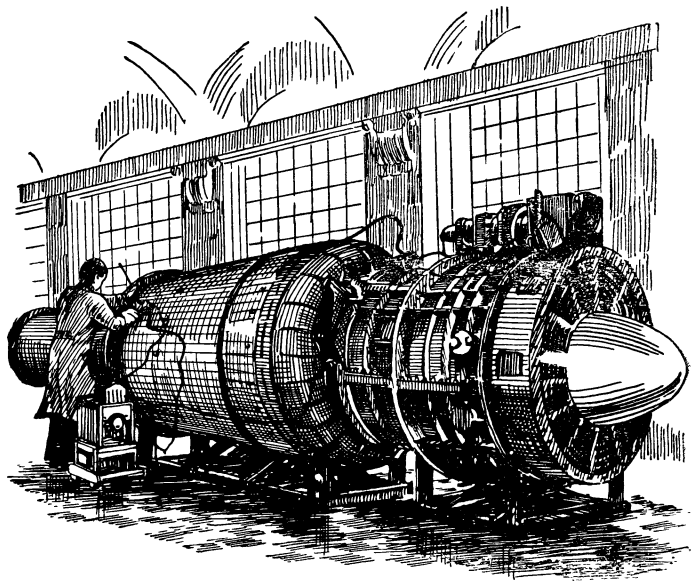
<sup>2</sup> Ракетным двигателем называется такой двигатель, в котором тяга создается за счет истечения продуктов сгорания жидкого топлива (горючего и окислителя, запасенных в баках на борту летательного аппарата).



Посмотрим теперь, как выглядят авиационные газотурбинные двигатели и их основные части.

Общий вид ГТРД и ТВД показан на фиг. 20 и 21.

На следующих фигурах показаны отдельные части турбовинтового двигателя. Между воздушным винтом и

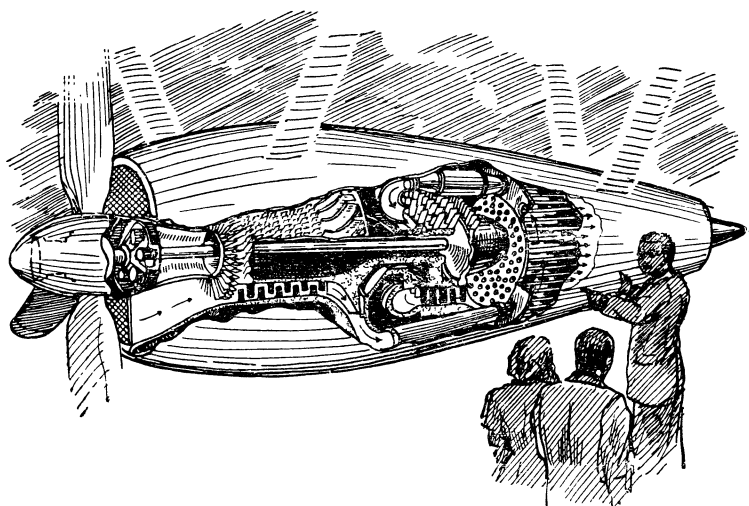


Фиг. 20. Общий вид ГТРД.

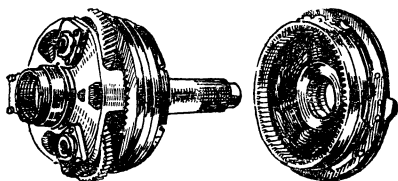
валом расположен редуктор (фиг. 21а), понижающий число оборотов вала винта. Это набор шестерен с разным числом зубцов. Редуктор понижает обороты вала винта нашего двигателя в 10 раз — с 15 000 оборотов турбины до 1 500 оборотов винта. Как устроен компрессор, показано на фиг. 21б.

Рядом вы видите камеру сгорания (фиг. 21в). Таких камер в двигателе несколько. Они соединены между собой трубками, благодаря которым при запуске пламя передается из камеры в камеру, а при работе выравнивается давление во всех камерах.

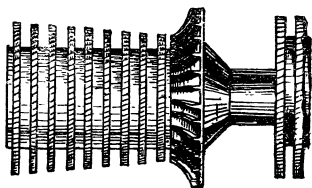
В сопловом аппарате, который показан на фиг. 21г, газ увеличивает свою скорость, проходя в расширяю-



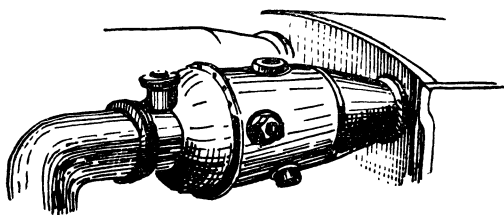
Фиг. 21. Общий вид ТВД (с регенератором).



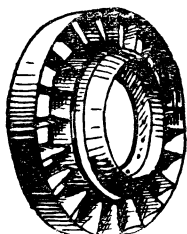
Фиг. 21а. Редуктор.



Фиг. 21б. Ротор (слева — компрессор с осевыми и центробежной ступенями, справа — двухступенчатая турбина).



Фиг. 21в. Камера сгорания.



Фиг. 21г. Сопловой аппарат.

щемся канале между лопатками аппарата. Сопловые лопатки — полые, охлаждаемые изнутри воздухом.

Турбина, также показанная на фиг. 21,б, имеет два колеса — турбинных диска с лопатками. Турбина не только выполняет свою основную задачу — вращать воздушный винт и компрессор, но и приводит в движение топливные и масляные насосы и другие вспомогательные механизмы.

На двигателе установлен регулятор, который поддерживает заданное летчиком число оборотов, не допуская опасного для турбины перегрева.

Надо отметить, что авиационная газовая турбина имеет меньшие размеры и весит значительно меньше, чем турбины других типов.

Так, например, турбовинтовой двигатель, который может развивать мощность 5 500 лошадиных сил, весит всего 1 350 кг.

Однако, условия, в которых работает авиационная газовая турбина тяжелее, чем у других турбин.

Из материалов берут все, что можно взять, до предела. Температуры — самые высокие, какие возможны, обороты — самые большие, какие только можно еще выдержать.

Но в таких условиях долго работать турбина, конечно, не может. И здесь приходится поступиться продолжительностью ее жизни. Срок службы авиационной газовой турбины исчисляется сотнями часов. А стационарная газовая турбина «живет» гораздо дольше — десятки тысяч часов. Она более долговечна, но зато тяжела и имеет большие размеры.

\*      \*

\*

Нашей отечественной технике принадлежит приоритет в разработке основных схем авиационных газотурбинных двигателей.

Газотурбинный реактивный двигатель был изобретен в России в 1909 г. инженером Н. Герасимовым (привилегия № 21024).

«Устройство для приведения в движение летательных аппаратов», запатентованное Герасимовым, состояло из газового генератора и двух турбин, «последовательно питаемых газами..., причем вторая турбина выпускает газы, толкающие прибор вперед».

Лейтенант флота М. Никольский в 1914 г. разработал проект турбовинтового реактивного двигателя, в котором газовая турбина должна была вращать воздушный винт, а продукты сгорания — создавать реактивную тягу.

«...Турбина, — говорилось в привилегии № 29245 М. Никольского, — может быть легко применена и для целей воздухоплавания».

За границей подобные проекты появились лишь в 1921 г.

Схему газотурбинного реактивного двигателя, близкую к современным, с многоступенчатой газовой турбиной, центробежным компрессором и камерой сгорания, предложил В. И. Базаров в 1924 г. (патент № 645). Позднее такая схема была вторично разработана в Англии.

Газотурбинными авиационными двигателями занимался и К. Э. Циолковский.

В 1933—34 гг. он написал работу «Парогазовый турбинный двигатель»<sup>1</sup>. На этой его работе тем более интересно остановиться, что о Циолковском чаще всего говорят, как о создателе теории межпланетного полета и реактивного движения. А между тем, Циолковский много сделал и в области реактивной авиации. Он разработал теорию реактивных самолетов и предложил проекты авиационных реактивных двигателей, в том числе и газотурбинного.

«За эрой аэропланов винтовых должна следовать эра аэропланов реактивных», — говорил он.

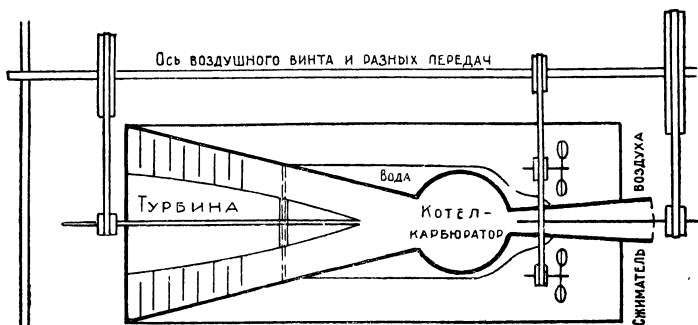
Вот какой двигатель предложил Циолковский (фиг. 22).

Компрессор нагнетает воздух в камеру сгорания (котел-карбюратор, как назвал ее Циолковский). В камеру одновременно с воздухом нагнетается в мелко распыленном виде нефть. В камере и частично в конической выхлопной трубе происходит сгорание. Газы расширяются, приобретают от этого большую скорость и, сильно охлажденные, приводят в действие многоступенчатую турбину. Котел-карбюратор и выхлопная труба охлаждаются водой; воду охлаждает нефть. Компрессор и нефтяной насос приводятся в действие турбиной. Турбина вращает также воздушный винт.

---

<sup>1</sup> Рукопись эта опубликована в книге: К. Э. Циолковский „Труды по ракетной технике“, Оборонгиз, 1947.

Циолковский предполагал, что газы, после того, как они прошли турбину, можно использовать для получения реактивной силы. Если мы теперь посмотрим на нашу схему, где изображен турбовинтовой двигатель, то найдем в двигателе Циолковского все части этой схемы.



Фиг. 22. Схема парогазового турбинного двигателя К. Э. Циолковского,

В нем есть и турбокомпрессорная часть, и воздушный винт, и сопло.

К. Э. Циолковский предложил и двухконтурные воздушно-реактивные двигатели.

Советский инженер А. М. Люлька, ныне дважды лауреат Сталинской премии, задолго до зарубежных конструкторов практически разработал конструкцию двухконтурного газотурбинного двигателя.

Очень много сделали отечественные ученые в деле создания теории воздушно-реактивных двигателей и газовых турбин (работы члена-корреспондента Академии наук СССР Б. С. Стечкина, профессора В. В. Уварова и других).

Советские конструкторы создали первоклассные образцы авиационных газотурбинных двигателей и реактивных самолетов.

\* \*  
\*

Газовая турбина важна не только для авиации.

Сравним паровоз и дизель-локомотив с газотурбинным локомотивом.

Коэффициент полезного действия газотурбинного локомотива больше, чем у паровоза, примерно вдвое (но

уступает к. п. д. дизель-локомотива). Возможно, что вес и размеры газотурбинного локомотива будут меньше, чем у дизель-локомотива такой же мощности.

Добавим сюда, что газовый турбовоз не требует воды для своей работы, за исключением воды для отопления поезда; что газовый турбовоз может использовать в качестве топлива сырую нефть, а в дальнейшем — и угольную пыль.

В горных районах газовый турбовоз тормозится на уклонах простым выключением подачи топлива. Тогда колеса локомотива вращают компрессор, который, забирая их энергию, служит тормозом. Воздух из компрессора выпускают прямо в атмосферу.

Опытные газовые турбовозы уже проектируются и строятся. Во время войны один такой турбовоз работал в Швейцарии на участке пути длиной в 75 км. Он возил разнообразные поезда — и легкие пассажирские, и товарные, маневрировал на станциях и показал себя с очень хорошей стороны. Паровозным бригадам (точнее — газотурбовозным) понравилась гибкость работы и простота управления этим локомотивом.

Хотя пока еще рано говорить об автомобильной газовой турбине, но забежим немного вперед. Предположим, что будут найдены материалы для турбин, выдерживающие значительно более высокие, чем теперь, температуры длительное время. Тогда возможно будет построить автомобильную газовую турбину — маленькую, достаточно экономичную, приспособленную к переменной нагрузке, работающую без всякой тряски.

В будущем газовая турбина появится на тяжелых автомобилях и танках, как появилась она на самолетах, как появляется она на локомотивах и судах.

Сравним судовую паротурбинную установку с газотурбинной (по данным, приведенным в книге В. П. Блюдова, «Газовые турбины»)

При одинаковой мощности и одинаковом примерно расходе топлива вес газотурбинной установки может быть снижен в 2,5 раза по сравнению с паротурбинной установкой.

Судовая газовая турбина расходует больше топлива, чем дизель той же мощности, но весит почти в 6 раз меньше.

Для кораблестроения большой интерес будут представлять также и газовые турбины замкнутого типа, о которых мы раньше упоминали. Мощность таких турбин регулируется изменением давления циркулирующего в ГТД газа.

В газотурбинной установке нет котлов, ей не нужна пресная вода, она более легка и компактна по сравнению с паросиловыми установками. Становится понятным, почему газовую турбину считают главным судовым двигателем будущего.

Но и до того времени, как турбина станет самостоятельным двигателем на локомотивах и судах, она уже применяется на них — в турбонагнетателях, использующих выхлопные газы двигателя.

Газотурбинный наддув воздуха значительно увеличивает мощность двигателя — часто в полтора раза. Вес из-за установки турбонагнетателя возрастает очень немного. Но зато развивается гораздо больше мощности. Поэтому турбонагнетатель и нашел такое широкое применение.

\*   \*  
\*

Первым потребителем мощных газовых турбин в промышленности были нефтеперегонные заводы.

Переработка нефти, как и некоторые другие химические производства, лучше протекает при повышенном давлении воздуха. Но сжатый воздух стоит недешево. Это натолкнуло на мысль применить более дешевый газотурбинный наддув, а для питания газовых турбин использовать готовый газ — отходы производства.

Не только отходящие газы различных промышленных производств пригодны для газовой турбины. Природный газ, получаемый из недр земли, газы из топки парового котла под давлением, доменные газы — все это с успехом может работать в турбине.

Очень широкое и разнообразное применение находит газовая турбина в доменном производстве.

Она особенно подходит как привод воздуходувки для доменных печей. Компрессор подает воздух для газовой турбины и может одновременно через ответвления подавать воздух в доменную печь. Камера сгорания снабжает турбину газом и одновременно может подогревать воздух для доменной печи.

Сталелитейные заводы потребляют очень много сжатого воздуха и электроэнергии. Работая на отходящих газах, турбина производит и то и другое.

Заводам и фабрикам бывает нужен пар. А газы, выходящие из газовой турбины, еще имеют высокую температуру. Их можно использовать для получения пара, если рядом с регенератором расположить еще теплообменник. Когда пар не требуется — весь горячий газ идет через регенератор и подогревает воздух, а когда нужен пар — газ частично отводится к теплообменнику и подогревает воду.

В промышленности газовой турбине предстоит большое будущее. Утилизационные газовые турбины могут применяться всюду, где отходами производства являются горячие газы, которые можно заставить работать в турбине.

Отходящие газы двигателей, содержащие воздух, а значит и кислород, можно использовать для питания газовых турбин, подогревая их в отдельной камере сгорания. Такие комбинированные поршнетурбинные установки используются в авиации.

\*   \*  
\*   \*

Даже самый лучший компрессор забирает за свои услуги около двух третей мощности турбины.

Можно ли отказаться от компрессора?

Утилизационные газовые турбины обходятся без компрессора, но у них нет и камеры сгорания, они не являются турбинами внутреннего сгорания.

А может ли турбина внутреннего сгорания все-таки работать без компрессора?

Может, если кислород для сгорания топлива она получит не из воздуха, и из какого-либо вещества — окислителя. Окислителем является, например, жидкий кислород или дымящаяся азотная кислота.

Во время войны на ракетах и некоторых реактивных самолетах применялись жидкостные ракетные двигатели. В таком двигателе горение происходит без доступа воздуха, кислород которого заменяется кислородом окислителя.

Можно заставить образующиеся при этом газы вращать турбинное колесо.

Кроме отсутствия компрессора, особенность такой турбины в том, что она сможет работать в безвоздушном пространстве.

Такая комбинация ракетного двигателя с газовой турбиной пока еще не применяется, но не исключена возможность, что подобные двигатели появятся в будущем.

\* \*  
\*

А теперь мы пойдем с вами на опытную газотурбинную электростанцию.

По сравнению с паротурбинной станцией она значительно меньше. Нет котельной и сложного вспомогательного оборудования, к которому так привыкли на обычных электростанциях. Такие станции особенно удобны для безводных местностей. Даже если применять промежуточное охлаждение воздуха водой, ее понадобится не более четверти того количества, которое нужно обычной паротурбинной станции.

Меньше людей обслуживает эту станцию.

Такую станцию можно автоматизировать, и в будущем, вероятно, появятся автоматические газотурбинные электростанции, работающие почти совсем без людей.

...С двух сторон к зданию станции примыкают постройки. В одних размещаются фильтры для очистки воздуха, идущего в компрессор, в других находятся воздухоподогреватели-регенераторы.

Мы — в машинном зале станции. На прочном фундаменте разместились все части установки (фиг. 23). Крайний слева — компрессор, посередине мы видим камеры сгорания, где-то за ними должна быть турбина, ее пока мы не видим и поэтому попросим снять крышку. Теперь мы хорошо можем разглядеть и компрессор, и турбину (фиг. 23а и 23б).

— Этот компрессор, — поясняет нам сменный инженер, — имеет 20 рядов лопаток; он подает воздух, сжимая его до давления в 5 атмосфер.

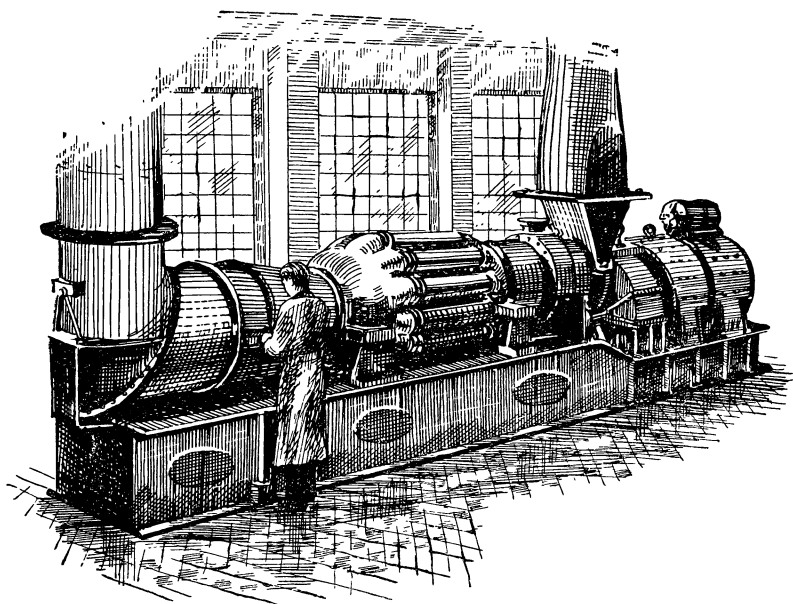
— Обратите внимание, — продолжает он, — после сжатия воздух разделяется на 12 отдельных потоков, идущих к 12 отдельным камерам сгорания.

Наше внимание привлекают камеры сгорания: цилиндры диаметром около 10 сантиметров и длиной около метра (фиг. 23в).

— В такой камере, — говорит инженер, — выделяется очень много тепла. Камеры сделаны двойными: внутренняя из них, где идет сгорание, все время окружена воздухом.

Турбина имеет 8 ступеней. Развивает она мощность в 6 000 л. с., из которых 4 000 забирает компрессор.

Тщательно обработанные лопатки имеют идеально гладкую поверхность.



Фиг. 23. Газотурбинная установка на электростанции.

— Вы думаете это сделано на станке? Это литье!

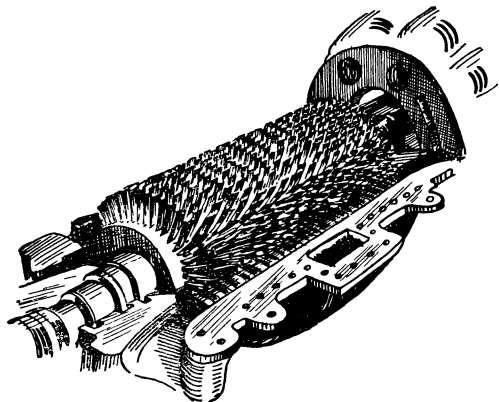
Из прочного жароупорного сплава литьем высшей точности изготовлены все лопатки.

— А что это за изогнутая труба в левом конце?

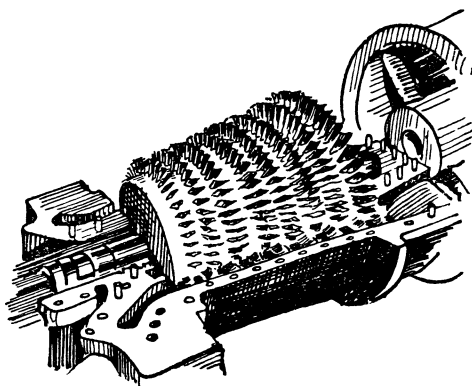
— Это выхлопная труба, через которую выпускаются отработавшие в турбине газы. Такая форма трубы выбрана для того, чтобы затормозить их скорость. Когда турбина работает с полной нагрузкой, газы покидают турбину со скоростью примерно 150 м/сек или 540 км/час — со скоростью самолета! Здесь же размещен регенератор, отнимающий тепло от газов и передающий

его воздуху по пути в камеру сгорания. В свою очередь, отходящие газы турбин могут нагревать воду, нужную для отопления или для других целей.

Генератор электрического тока воспринимает полезную мощность газовой турбины.



Фиг. 23а. Компрессор.



Фиг. 23б. Турбина.

Рядом с ним мы видим систему зубчатых колес, сцепленных друг с другом.

— Редуктор, — поясняет инженер. — Он понижает обороты во столько раз, во сколько одна шестерня имеет меньше зубцов, чем другая. Это нужно потому, что турбина делает около 9 000 об/мин, а генератор работает

при 1 000 оборотов. Редуктор бывает нужен и в судовом, и в турбовозном и в турбовинтовом авиационном двигателе. Обороты турбины чересчур велики и для винта самолета или судна, и для колес локомотива, которые должны делать меньше оборотов, чем турбина.

Пока к. п. д. газовой турбины невелик, газовая турбина на электростанции — еще помощник паровой турбины. Но газотурбостроение шагает вперед, и скоро мы увидим газовую турбину на электростанции как полноправного хозяина. Это не значит, конечно, что с появлением газовых турбин на электростанциях там не будет паровых турбин.

Не надо забывать, что теперь электростанции работают на дешевом — твердом топливе, а газовые турбины пока нуждаются в более дефицитном жидком топливе.

Вот почему газовая турбина только тогда будет широко применяться на электростанциях, когда она сможет работать на твердом топливе — угле. И не для одних только электростанций важны турбины на твердом топливе. Газовая турбина для локомотива на угле — это значит локомотив без воды с более высоким, чем у паровоза, коэффициентом полезного действия.

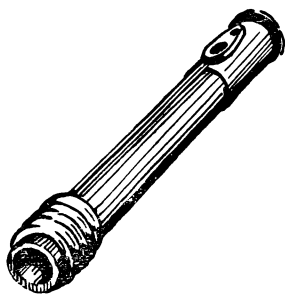
Возможность использования твердого топлива — большое преимущество газотурбинной установки перед двигателем внутреннего сгорания.

Но турбина на угле — это и новые трудности.

Дело в том, что при сжигании угля образуется зола. Она забивает камеру сгорания, а попадая с большой скоростью на лопатки турбины, постепенно разрушает их. В теплообменнике, где, наоборот, скорость газов уменьшается, зола свободно выпадает плотным слоем. Опасны для турбины и крупные несгоревшие частицы угля.

Пока что эти трудности не удалось полностью преодолеть. Но пути и здесь намечаются.

Удалить золу можно, заставляя газы в камере двигаться по спирали. Тогда под действием центробежных



Фиг. 23в. Камера сгорания.

сил частицы золы будут отбрасываться на стенки камеры и постепенно оседать на дно.

Уголь можно раздробить и размолоть в угольную пыль на частички очень маленьких размеров. Затем угольная пыль, размельченная на маленькие частички, которые уже легко могут сгорать, захватывается струей воздуха, как одеколон из пульверизатора, и сгорает в камере сгорания.

Как может выглядеть локомотив с угольной газовой турбиной, показано на фиг. 24.

В бункере — запас угля; он сушится, размалывается в мельнице и угольная пыль очень тонкого размолта вдвухается в камеру сгорания. Компрессор подает туда воздух. Газы по пути в «сепараторе» очищаются от золы и идут в турбину.

Есть и другой путь использования угля.

Еще в 1888 г. великий русский ученый Дмитрий Иванович Менделеев высказал идею подземной газификации угля. При подземной газификации уголь непосредственно под землей превращается в горючий газ. Этот газ будет служить топливом для турбин. Владимир Ильич Ленин писал о подземной газификации: «Газ приводит в движение газовые моторы, которые дают возможность использовать вдвое большую долю энергии, заключающейся в каменном угле, чем это было при паровых машинах. Газовые моторы, в свою очередь, служат для превращения энергии в электричество, которое техника уже теперь умеет передавать на громадные расстояния».

В нашей стране впервые была построена газовая турбина, работающая на газе, получаемом при подземной газификации угля.

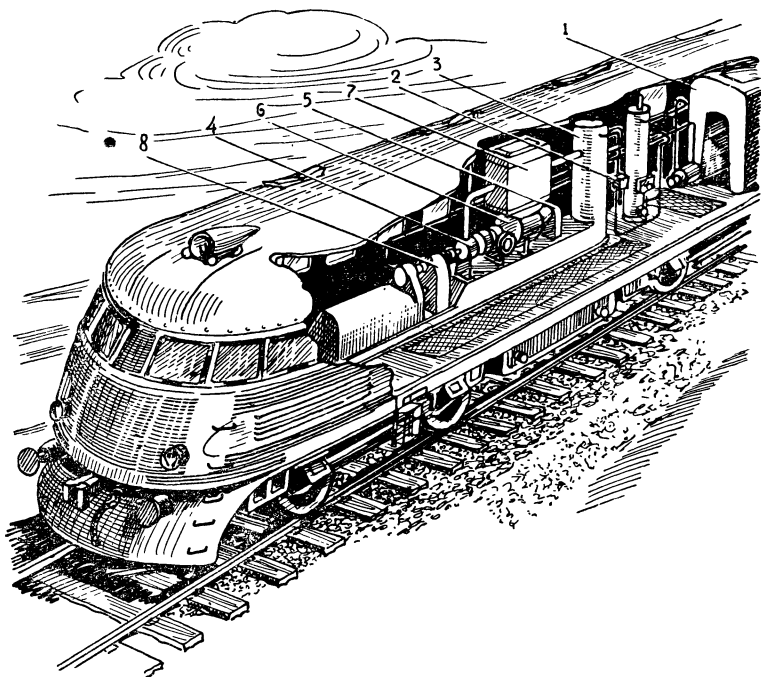
В нашей стране ведутся успешные работы по подземной газификации угля. Советские ученые и инженеры построили первые станции подземной газификации углей, снабжающие промышленность газом.

«Одна из основных задач советской энергетики, — говорит профессор В. А. Голубцов, руководитель советской делегации на мировом энергетическом конгрессе в 1950 г., — постройка для мирных целей газовых турбин, работающих не на жидком и газообразном топливе (это, по существу, можно считать решенным), а на твердом... Мы и в этом далеко опередили энергетику капиталистических стран».

И недалеко то время, когда осуществляются пророческие слова Ленина.

Газовая турбина на каменном угле — дешевом топливе — будет двигателем будущего.

Наконец, есть еще третий путь использования твердого топлива в газовых турбинах, о котором мы уже гово-



Фиг. 24. Схема возможного устройства газотурбовоза, работающего на угле.

1 — бункер для угля; 2 — мельница; 3 — камера сгорания; 4 — компрессор;  
5 — сепаратор; 6 — турбина; 7 — регенератор; 8 — редуктор.

рили. Этот путь — турбина замкнутого типа. В ней работает чистый воздух или газ. Лопатки турбины и поверхность теплообменника не загрязняются при этом золой. Любое твердое топливо можно использовать для такой турбины. Годаются для нее и горючие газы, полученные при газификации угля.



Мы говорили о будущем газовой турбины.

Но будущее ли это?

Уже летают самолеты с газовыми турбинами, строятся газовые турбовозы, судовые газовые турбины, газотурбинные электростанции.

Правильнее было бы сказать: будущее, которое уже становится настоящим.

И газовая турбина, которую еще недавно называли двигателем будущего, уверенно идет по своему пути. От первых турбин, огромных, неуклюжих, но маломощных, — динозавров в мире машин, но динозавров с силой кролика, к мощной, легкой, компактной турбине — самому совершенному тепловому двигателю.

Таков этот путь.

Наш рассказ о газовой турбине близится к концу.

Мы познакомились с устройством газовых турбин и их многообразным применением.

Какое же место будет занимать ГТД среди других двигателей?

Газовая турбина еще только начинает свое развитие. Но нельзя, конечно, представить себе дело таким образом, что в дальнейшем с появлением ГТД придется сдать в архив и паровую турбину, и двигатель внутреннего сгорания. Всем двигателям найдется работа.

И даже использование внутриатомной энергии не означает конца двигателей паровых и газовых. Мало того, можно предполагать, что именно эти-то двигатели и дадут нам возможность использовать атомную энергию. Тепло, много тепла — вот что даст нам эту возможность. Один грамм урана при своем распаде освобождает такую же энергию, какую дает сжигание двух тонн угля! Тепло — это пар, значит, паровые турбины. Тепло — это горячий воздух или газ, значит, газовые турбины. Атомная энергия позволит нам и старый двигатель — паровую турбину и новый — газовую турбину использовать по-новому.

Быть может, газовая турбина будет одним из первых двигателей, использующих атомную энергию.

Возможно, со временем турбинные установки, работающие на «атомном» топливе, будут широко применяться в технике — в промышленности и на транспорте.

Паровую турбину давно пытались установить на самолете. Но большой вес и размеры паротурбинной установки препятствовали этому.

Трубка из жароупорного сплава с небольшим количеством «атомного» топлива заменит топку и баки с горючим. Эта «топка» даст тепло, нужное для получения пара или горячего воздуха. Турбины вращают воздушные винты, гребной винт судна, колеса локомотива или автомобиля.

Комбинированные парогазовые турбинные установки с паровыми и газовыми турбинами на «атомном» топливе появятся, возможно, на мощных электростанциях.

Будут применяться и другие способы использования атомной энергии. «Советские ученые, — пишет профессор В. А. Голубцов, — нашли другие технологические схемы, иные технические возможности для мирного использования атомной энергии, превращая ее непосредственно в тепло или в электричество. Советская наука намного опередила зарубежную в области атомной энергетики. В комплексном использовании атомной энергии для мирных целей видим мы решение проблемы».

\*   \*  
\*

Газовая турбина — новая глава в истории тепловых двигателей.

Эта глава еще только начинается и невозможно предугадать, сколько трудностей предстоит одолеть, пока мы дойдем до последней ее страницы.

Нужно будет совершенствовать газовые турбины, создавать турбины на твердом топливе, строить мощные турбины для электростанций, для промышленности и транспорта.

Газовая турбина займет свое место в новой технике нашей страны, победоносно строящей коммунизм.

Борьба за газовую турбину продолжается.

Мы видели, с каким большим трудом были достигнуты первые успехи газовой турбины.

Впереди немало трудностей, но нет таких трудностей, которые не отступили бы перед упорным трудом советского человека, — борца за новую технику, за счастье и процветание нашей Великой Родины!

---

---

## **Использованная литература**

1. Маковский В. М., Опыт исследования турбины внутреннего сгорания с постоянным давлением сгорания, Госиздат Украины, 1925, 212 стр.

2. Зотиков Г. И., К решению проблемы турбины внутреннего сгорания, „Вестник котлотурбообъединения“, № 4, 1933, стр. 38—46; Какой термический цикл должен быть принят для турбин внутреннего сгорания, „Известия ВТИ“, № 1, 1935.

3. Уваров В. В., Газовые турбины, М.—Л., ОНТИ, 1935, 214 стр.

4. Блюдов В. П., Газовые турбины, М.—Л., Госэнергоиздат, 1948, 152 стр.

5. Кириллов И. И., Газовые турбины, М.—Л., Машгиз, 1948, 387 стр.

6. Жирицкий Г. С., Газовые турбины, М.—Л., Госэнергоиздат, 1948, 504 стр.

7. Жирицкий Г. С. Авиационные газовые турбины, М., Оборонгиз, 1950, 512 стр.

8. „Газовые турбины“, Сборник статей (Центральный котлотурбинный институт, кн. 7), М.—Л., Машгиз, 1947, 80 стр.

9. Гельфенбейн С. Х., Газовые турбины в доменном производстве, М.—Л., Машгиз, 1946, 32 стр.

10. Шнеэ Я. И., Теория газовых турбин, М.—Л., Машгиз, 1950, 387 стр.

11. Иноземцев Н. В. и Зув В. С., Авиационные газотурбинные двигатели, М., Оборонгиз, 1949, 468 стр.

12. Кулагин И. И., Теория газотурбинных реактивных двигателей Л. ЛКВВИА, 1949, 256 стр.

13. Применко А. Е., Газовые турбины и применение их в авиации, под ред. проф. Г. С. Жирицкого, М., Оборонгиз, 1950, 156 стр.

14. Цукерман Р. В., Об основных этапах в истории развития газовой турбины, „Котлотурбостроение“, 1949, № 5, стр. 1—5.

15. Фрейдман Е., Отечественные турбинные двигатели, „Вестник воздушного флота“, 1950, № 3, стр. 53—58 (в статье приведена схема газотурбинной установки П. Д. Кузьминского, фиг. 2).

Кроме того, в работе над книгой использован ряд других материалов, опубликованных в периодической печати и реферативных сборниках.

---

---

---

## *Содержание*

Предисловие . . . . .	4
Введение . . . . .	5
1. Изобретение, опередившее свое время . . . . .	7
2. Новый тепловой двигатель . . . . .	27
3. На земле, в небесах и на море . . . . .	54

---

Редактор *Л. И. Гордон*

Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в набор 3/V 1951 г.

Подписано к печати 17/X 1951 г.

Бумага  $84 \times 108 \frac{1}{32} = 1 \frac{1}{4}$  бумажн. лист.—4,10 п. л.

Уч.-изд. л. 4,3

T-08254

Тираж 5 000 экз.

Заказ № 1193

---

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Цена 2 п. 15 к.

