

А. Джадж

Газотурбинные двигатели малой мощности

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621
ББК 34.4
А11

А11 **А. Джадж**
Газотурбинные двигатели малой мощности / А. Джадж – М.: Книга по Требо-
ванию, 2024. – 422 с.

ISBN 978-5-458-36848-3

Рассмотрены вопросы теории и конструирования газотурбинных двигате-
лей малой мощности.

ISBN 978-5-458-36848-3

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

За последние 10—15 лет за рубежом проведена большая научно-исследовательская и конструкторская работа по решению основных проблем стационарного и транспортного газотурбостроения. В результате этого созданы эффективные газотурбинные установки, которые нашли применение в различных отраслях промышленности и др. областях хозяйства. Некоторые типы газотурбинных установок вследствие своих преимуществ по сравнению с другими тепловыми двигателями находятся в фазе серийного производства и используются для магистральных газопроводов, электростанций, морских судов и др.

Некоторые недостатки и трудности газодинамического, термодинамического и практического характера, имеющие место при создании экономичных газотурбинных установок малой мощности, поставили перед конструкторами вопрос о необходимости заняться в первую очередь разработкой и созданием газотурбинных двигателей средней мощности (1500—10 000 *квт*) и впоследствии приступить к созданию двигателей большой мощности порядка 25 000, 50 000 и 100 000 *квт*. Успешное решение многих научных проблем и полученный опыт при конструировании и производстве газотурбинных установок средней мощности, а также накопленный опыт их эксплуатации позволили приступить к созданию газотурбинных двигателей малой мощности порядка 10—1200 *квт*, которые, несмотря на ряд недостатков, могут успешно применяться в различных областях народного хозяйства.

За последние годы легкие газотурбинные двигатели небольшой мощности начинают применять в качестве энергетических и транспортных установок.

Однако необходимо отметить, что при создании газотурбинных двигателей небольшой мощности приходится решать ряд принципиально новых и сложных проблем, отличных от уже решенных в области газотурбостроения больших стационарных мощностей, в том числе и авиационных двигателей.

Несмотря на это, легкое газотурбостроение в некоторых странах достигло высокого технического развития и стало новой отраслью энергетической машиностроительной промышленности.

Этому техническому прогрессу способствовали результаты эксплуатации многих маломощных двигателей, которые показали ряд преимуществ по сравнению с поршневыми, как, например, небольшой вес, малые габариты, простота конструкции, быстрый запуск в любых климатических условиях, многотопливность, низкая стоимость, простота эксплуатации, возможность многоцелевого использования и др.

В настоящей книге довольно подробно излагаются результаты проведенной работы за рубежом в области создания и внедрения газотурбинных двигателей малой мощности в различные отрасли хозяйства. Книга состоит из 10 глав. В гл. 1 приводится краткий исторический обзор некоторых наиболее важных исследований в области газотурбинных двигателей. В гл. 2 дано общее описание схем простых газотурбинных двигателей малой мощности с центробежным компрессором, с осевым компрессором, радиальной центростремительной турбиной и указываются преимущества и недостатки этого типа турбины, газотурбинного двигателя со свободной силовой турбиной. Здесь же излагаются особенности и преимущества газотурбинных двигателей малой мощности (простота конструкции, хорошая механическая уравновешенность, небольшой вес, малые габаритные размеры, более низкое рабочее давление, многотопливность, простота системы смазки и небольшой расход масла, бездымный выхлоп, высокие рабочие числа оборотов) и некоторые недостатки, такие, как низкие значения к. п. д. на нерасчетных режимах, влияние высоких температур на прочностные характеристики металлов, сложность

механической обработки рабочих лопаток с учетом ее стоимости.

Некоторые теоретические сведения для цикла с постоянным давлением сгорания (термические к. п. д. цикла, зависимость к. п. д. от температуры цикла, к. п. д. компрессора, турбины и т. д.) изложены в общедоступной форме в гл. 3.

В гл. 4 рассматриваются вопросы, связанные с эффективностью газотурбинных двигателей и влиянием основных параметров на к. п. д. двигателя.

Пути улучшения характеристик малых газотурбинных двигателей (повышение к. п. д. элементов двигателя, применение теплообменников, охлаждение турбин) изложены в гл. 5. Здесь же приводится описание различных типов теплообменников: регенеративного, рекуперативного, вращающегося регенератора, трубчатого регенератора с противотоком, регенератора с неподвижным теплоемким элементом, а также краткое описание теплообменников некоторых фирм.

В книге рассматриваются вопросы применения газотурбинных двигателей на автомобилях. Указаны их недостатки и преимущества (гл. 6). Приводится описание автомобильных газотурбинных двигателей фирм «Ровер», «Остин», «Крайслер», «Дженерал Моторс» и др.

Свободно-поршневые двигатели рассматриваются в гл. 7, в которой изложены принципы их работы, преимущества и недостатки этих двигателей, а также указаны области их применения.

Приводится описание отдельных типов камер сгорания и топливных систем, применяемых в малых газотурбинных двигателях (гл. 8). Рассматриваются применяющиеся принципиальные системы регулирования подачи топлива и основные требования, предъявляемые к ним. Дано описание некоторых типов топливных форсунок.

Высокожаропрочным материалам, применяющимся для изготовления отдельных элементов газотурбинных двигателей с изложением основных предъявляемых к ним требований, посвящена гл. 9.

В заключение (гл. 10) приводится описание отдельных типов работающих газотурбинных двигателей малой

мощности и области их эффективного фактического применения.

Как указано в предисловии автора, цель этой книги состоит в том, чтобы в сравнительно простой форме изложить наиболее важные теоретические и экспериментальные проблемы, связанные с созданием газотурбинных двигателей малой мощности, рассмотреть некоторые практические вопросы и привести примеры удачных конструкций газотурбинных и свободно-поршневых двигателей. Поставленную автором задачу можно считать успешно выполненной. Одновременно с этим необходимо отметить, что если в части теоретических вопросов изложение носит популярный характер и не дает чего-либо нового, то в области описания конструкций двигателей приводится много полезных данных, полученных на основе эксплуатации многих типов работающих газотурбинных двигателей малой мощности. Одновременно книга знакомит читателя с вопросами развития легкого газотурбостроения в основных зарубежных странах (США, Англия, Франция и др.) и путями внедрения газотурбинных двигателей малой мощности.

Книга, несомненно, представляет интерес для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами конструирования и эксплуатации малых газотурбинных двигателей.

Н. П. Стульников

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Успешное развитие авиационного газотурбинного двигателя продемонстрировало многие его преимущества по сравнению с поршневым двигателем внутреннего сгорания, а именно: значительно меньший вес и объем, почти идеальную уравновешенность, меньшее количество деталей, более низкие рабочие давления, конструктивную простоту, а также простоту обслуживания и некоторые другие. Конечно, газотурбинный двигатель в настоящее время обладает также определенными недостатками и при его создании возникают еще некоторые трудности. Однако основным недостатком газотурбинного двигателя является относительно высокий удельный расход топлива, который в большинстве случаев может быть снижен. Так, удельный расход топлива большинства современных двухкаскадных двигателей с высокой степенью повышения давления либо равен, либо в ряде случаев даже меньше удельного расхода топлива поршневого двигателя такой же мощности с его многочисленными движущимися возвратно-поступательно и вращающимися элементами.

Благодаря успехам в развитии газотурбинного двигателя в авиации стали делать попытки применения этого типа двигателя в других областях. Были проведены исследования с целью решения новых задач, связанных с применением газотурбинных двигателей, особенно двигателей небольших мощностей, в различных областях. Результаты этих исследований показывают, что газотурбинный двигатель во многих случаях по минимальному весу и объему с учетом указанных выше преимуществ превосходит бензиновый двигатель или двигатель Дизеля равных мощностей. Однако по перво-

начальной стоимости с бензиновым двигателем, находящимся в массовом производстве, могут конкурировать только наиболее простые типы газотурбинных двигателей. В связи с этим при конструировании самых малых двигателей мощностью порядка 40—150 л. с. не следует принимать во внимание некоторые из тех достижений, которые получены в авиационных газотурбинных двигателях. Это в свою очередь означает снижение термического к. п. д. двигателя и связанное с этим значительное увеличение удельного расхода топлива. Этот недостаток в некоторой степени компенсируется в газотурбинном двигателе возможностью использования в нем более дешевых сортов топлив, а также незначительным расходом смазки. В некоторых случаях, особенно при использовании двигателя на более тяжелых грузовых и транспортных автомобилях, становится возможным применение теплообменников соответствующих размеров. В этом случае удельный расход топлива более современных газотурбинных двигателей приблизительно равен расходу топлива в бензиновом двигателе. Однако это достигается за счет увеличения удельного веса двигателя.

В данной книге рассматриваются вопросы, связанные с конструированием газотурбинных двигателей, — от самых малых, мощностью 30—40 л. с., до более крупных двигателей, мощностью 1000—1500 л. с., причем основное внимание уделяется двигателям средней мощности, т. е. двигателям начиная от сравнительно простых малых газотурбинных двигателей, использующих центробежный компрессор и осевую или радиальную центробежную турбину (отбор мощности от которых производится через вал), до более крупных двигателей мощностью 700—1500 л. с. Двигатель мощностью 750—900 л. с. обычно состоит из 10-ступенчатого осевого компрессора, 2-ступенчатой турбины, приводящей компрессор, 1- или 2-ступенчатой отдельной силовой турбины и имеет сравнительно малые удельный вес и расход топлива.

Существующие малые газотурбинные двигатели имеют довольно широкое распространение: эти двигатели применяются в качестве портативных и стационар-

ных силовых установок, таких, как электрические генераторы, воздушные компрессоры, центробежные насосы для дренажных, противопожарных и других целей; как силовые установки для легких самолетов, включая вертолеты, небольшие пассажирские и транспортные самолеты; как вспомогательные двигатели для увеличения взлетной мощности самолетов с поршневыми двигателями; в качестве силовых установок управляемых снарядов и беспилотных самолетов, используемых в качестве мишеней; как портативные наземные или бортовые силовые средства (обычно воздушного типа) для запуска больших авиационных реактивных двигателей, как силовые установки автомобилей, для привода небольших морских судов, таких, как катера, спасательные суда и т. д.; в качестве агрегатов турбонаддува, а также двигателей, работающих на газах от котельных установок, которые используют воздух высокого давления, или от газов, образующихся при промышленных процессах.

Целью этой книги является представить в сравнительно простой форме некоторые из наиболее важных теоретических и экспериментальных проблем, связанных с созданием малых газотурбинных двигателей, рассмотреть некоторые практические вопросы и привести примеры удачных конструкций гражданских двигателей, включая также малые свободно-поршневые двигатели.

Ввиду обширности вопросов эту тему невозможно рассмотреть достаточно полно в относительно малом объеме книги. Читатель, желающий получить более подробную информацию по интересующим его вопросам, может обратиться к первоисточникам, указанным в библиографии в конце книги.

А. Джадж

НЕКОТОРЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Принцип действия турбины как потенциальной силовой установки был известен в очень давние времена, относящиеся еще к появлению несовершенной реактивной турбины Хиро (около 130 лет до н. э.) и простой активной турбины Джиованни Бранка (1629 г.). Эти турбинные колеса, работавшие на паре, впоследствии уступили место машинам, использующим в качестве рабочего тела газы, образующиеся при сгорании смеси топлива с воздухом. Самым первым газотурбинным двигателем, имевшим практическое значение, был двигатель Джона Бербера из Нанитона, в патенте которого за № 1833 от 1791 г. описывалась газовая турбина постоянного давления с непрерывным сгоранием топлива и системой водяного охлаждения турбинного колеса. Начиная с этого времени газовые и паровые турбины привлекали внимание многих изобретателей. Появился ряд патентов и экспериментальных двигателей. Среди первых турбостроителей наиболее выдающимися были: английский изобретатель В. Ф. Фернибоу (1850 г.); французы Арменго и Лемаль (1894 г.), которые создали двигатель мощностью 500 л. с. со скоростью вращения ротора 5000 об/мин, снабженный форсункой для распыления жидкого топлива, электрической свечой зажигания и водяными жиклерами для впрыскивания воды с целью охлаждения турбинных сопловых и рабочих лопаток; Штольц (1900—1904 гг.), двигатель которого имел осевой многоступенчатый компрессор, многоступенчатую турбину и теплообменник. Вследствие низких к. п. д. компрессора и турбины двигатель не нашел практического применения. Чарльз Парсон, изобретатель паровой турбины, в 1884 г. получил патент, содер-

жащий описание основных элементов современного газотурбинного двигателя. Немец Х. Х. Хольцварт (1905 г.) изобрел газотурбинный двигатель со сгоранием при постоянном объеме, который был изготовлен швейцарской фирмой «Браун Бовери» в 1911 г. Впоследствии фирма «Браун Бовери» разрабатывала и выпускала двигатели со сгоранием при постоянном давлении или непрерывного сгорания для локомотивов, стационарных, морских и других установок. Иендрассик (1939 г.) создал двигатель со сгоранием при постоянном давлении, который имел компрессор с к. п. д. 0,85 и турбину с к. п. д. 0,84—0,85. Швейцарец Альфред Буши в 1908 г. исследовал возможность использования выхлопных газов от двигателей Дизеля для привода воздушных компрессоров, предназначенных для наддува этих двигателей. Впоследствии фирмой «Браун Бовери» выпускались в течение длительного времени хорошо известные турбонагнетатели Буши. Француз А. Рато примерно в 1917 г. впервые создал турбонагнетатели для поршневых авиационных двигателей. Применение этих турбонагнетателей в этот период позволило увеличить мощность двигателей на больших высотах полета. Американец С. А. Мосс в 1902 г. провел экспериментальные исследования турбин, работающих на выхлопных газах поршневых двигателей. Впоследствии эти исследования привели к конструкции Ширбонди и затем к разработке турбонагнетателей для авиационных двигателей. Итальянец Секондо Кампини является одним из первых изобретателей авиационного реактивного двигателя, чей самолет «Капрони — Кампини» совершил в 1940 г., по-видимому, первый полет протяженностью 270 км от Милана до Рима. Уиттл в 1930 г. опубликовал патент, содержащий описание газотурбинного двигателя в том виде, в каком он известен в настоящее время, и реактивного патрубка «прямоточной» системы. Опубликование более раннего патента Уиттла с его чертежами, вероятно, послужило толчком для немецких промышленников, занимавшихся производством авиационных двигателей. Так, с 1937 г. фирмы «Б.М.В.», «Юнкерс», «Хейнкель—Хирт» и «Даймлер—Бенц» начали проводить экспериментальные работы по авиационным газотурбинным двигателям.

Результаты исследований первых изобретателей показали, что реактивная или активная турбина может производить полезную работу, при этом в качестве рабочего тела используется пар, парогазовая смесь или газ и даже нагретый воздух. Однако мощность турбин была невелика. Тем не менее в некоторых случаях мощность, развиваемая турбиной, была уже достаточной для привода компрессора. В последующий период развития, начиная примерно с 1900 г., были созданы опытные образцы газотурбинных двигателей, многие из которых производили полезную мощность. Однако расход топлива был еще велик. Так, газотурбинный двигатель Арменго и Лемаля имел удельный расход бензина $3,81 \text{ кг/л. с. час}$, а двигатель Караводина (1908 г.) — $2,22 \text{ кг/л. с. час}$. Это очень высокие расходы топлива, если учесть, что современные авиационные двигатели без теплообменников имеют удельный расход от $0,191$ до $0,318 \text{ кг/л. с. час}$. Крупные промышленные газотурбинные установки с теплообменниками, работающие по циклу с промежуточным охлаждением и имеющие другие усовершенствования, имеют еще более низкие значения удельного расхода топлива, приближающиеся к удельному расходу топлива двигателей Дизеля.

В данной главе приведен очень краткий исторический обзор некоторых наиболее важных исследований в области газотурбинных двигателей. Для тех, кто желает получить более полную информацию по этому и другим вопросам, в конце книги приведена библиография.

В заключение можно отметить, что большинство исследователей, работавших в области газотурбинных двигателей, ясно представляли себе, какие потенциальные возможности заключает в себе газотурбинный двигатель. Они верили, что такой двигатель может быть значительно легче, меньше по объему, более уравновешенным при работе, чем поршневые двигатели; что он может быть более дешев в изготовлении, чем существующие паровые и другие современные двигатели внутреннего сгорания, более прост в эксплуатации. Современный газотурбинный двигатель, в основном, обладает всеми этими достоинствами, хотя еще существуют некоторые нерешенные проблемы.