

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ НА ПРИМЕРЕ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ «ГТД-350»

А. Каиргалиулы¹

¹vengector@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. Данная статья исследует проблемы, связанные с камерой сгорания авиационного газотурбинного двигателя ГТД-350, который применяется на вертолете Ми-2. В статье описываются причины актуальности этих проблем, а также рассматриваются возможные способы их решения, включая дефекты на жаровой трубе, которые могут возникать после переработки двигателя. Подробно описываются причины проблем, связанных с проектированием малоразмерных газотурбинных двигателей, дающие понять, почему в России данный тип мало изучен. Приведены аргументы в сторону изучения данного типа двигателей.

Ключевые слова: малоразмерный газотурбинный двигатель, МГТД, проектирование, проблемы, камера сгорания, КС, вертолет, Ми-2, ГТД-350, жаровая труба, дефекты, факторы, развитие МГТД.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент в малой авиации на большинстве летательных аппаратов (ЛА) используются авиационные поршневые двигатели (АПД), причём преимущественно импортные. Малоразмерные газотурбинные двигатели могут использоваться в различных секторах промышленности. Например, они могут применяться в энергетической отрасли для генерации электроэнергии в малых мощностях, а также для обеспечения электроснабжения удаленных объектов.

Также малоразмерные газотурбинные двигатели могут быть использованы в транспортной отрасли для привода легких летательных аппаратов, главным образом, вертолетов и БПЛА. Эти двигатели обладают высокой мощностью и малыми габаритами, что делает их идеальным выбором для легких воздушных судов (ВС).

Кроме того, малоразмерные газотурбинные двигатели могут применяться в военном деле для привода беспилотных летательных аппаратов, крылатых ракет, а также для установки на боевые машины и суда.

Таким образом, малоразмерные газотурбинные двигатели имеют широкий спектр применения в различных секторах промышленности и могут являться ключевым элементом различных технологических решений. В МГТД также можно использовать более тяжелые виды топлива: дизельное топливо, керосин и даже низкооктановый бензин.

Причины малого изучения МГТД. Существуют несколько факторов, почему в России малоразмерные газотурбинные двигатели мало изучены. Одной из причин может быть недостаток финансирования и ресурсов для проведения исследований в этой области. Также возможно, что компании, занимающиеся разработкой и производством газотурбинных двигателей, сосредоточены на разработке и производстве более крупных двигателей, так как они обычно имеют большую выгоду и потенциал для коммерциализации.

Еще одним фактором может быть отсутствие достаточного количества специалистов в этой области, которые могут проводить исследования и разрабатывать новые технологии. Некоторые специалисты в области газотурбинных двигателей могут выбирать работу в более крупных компаниях, где у них больше возможностей для карьерного роста и развития.

Кроме того, малоразмерные газотурбинные двигатели имеют более узкое применение, чем их более крупные аналоги, и, следовательно, могут иметь более ограниченный рынок и меньший спрос на них. Это также может оказывать влияние на уровень исследований и разработок в этой области.

Факторы, влияющие на проектирование МГТД. При уменьшении размеров газоздушного тракта ниже определенного предела (зависящего от уровня проектирования и производства) их топливная экономичность резко падает вследствие относительного возрастания потерь энергии. Существующие МГТД в классе мощности 150...500 л.с. уступают АПД по показателю топливной эффективности (удельный расход топлива 0,35 кг/(л.с.ч) вместо 0,2 кг/(л.с.ч)) [1]. Кроме того, чтобы получить оптимальные окружные скорости лопаток компрессора и турбины с учетом ограниченного объема, необходимо повышать частоту вращения, что вызывает дополнительные конструктивные и технологические трудности. Кроме того, проектирование малоразмерных газотурбинных двигателей также связано с ограниченными финансовыми и техническими ресурсами. В результате, разработчики малых газотурбинных двигателей должны балансировать между требованиями к надежности, эффективности и стоимости разработки и производства.

Одна из ключевых проблем проектирования камер сгорания (КС) МГТД заключается в том, что используется тот же опыт, что и при создании КС больших двигателей. Эта проблема была описана в 1986 г. NASA [2].

Ошибки в проектировании связаны, в первую очередь, с учетом в должной степени всех тех различий, которые имеются в конструкции, размерах и условиях работы КС больших и малых ГТД. В конечном итоге это сказывается на показателях силовой установки и требует большого объема доводочных работ. Особенности организации рабочего процесса КС малоразмерных ГТД (МГТД) накладывают наиболее существенный отпечаток на их облик и показатели качества работы. Задача усложняется тем, что процессы в КС МГТД изучены еще недостаточно, отсутствует обобщение экспериментальных результатов, что затрудняет оптимизацию параметров при разработке КС.

Несмотря на эти факторы, в последнее время в России начинается активное развитие малоразмерных газотурбинных двигателей и проводятся исследования в этой области, так как они имеют большой потенциал для использования в некоторых секторах промышленности, таких как энергетика, транспорт и военное дело.

Ключевые идеи. Моделирование ГТД в сторону уменьшения размеров имеет два подхода:

1. **Общепринятый (упрощенный).** В это случае проектируют двигатель, отталкиваясь от тяги или мощности. В этом случае отмечается ряд особенностей. Например, последняя ступень компрессора является центробежной и связана с КС протivotочной схемой. Такая особенность может быть использована и в больших двигателях и не позволит полностью выявить специфику организации рабочего процесса в МГТД.

2. **Подход из лопаточных машин,** в котором указано, что уменьшение абсолютных размеров отражается на уровне коэффициента полезного действия (КПД) из-за роста относительных величин неоднородностей потоков в межлопаточных каналах и потерь через зазоры.

Следует также помнить, что не все можно пропорционально уменьшить. Приборы, агрегаты, подшипники относятся к такому. Это приводит к росту их относительного веса. Возможно, это является одной из причин, по которым конструкторы МГТД отказываются от воспламенительных устройств (ВУ), предпочитая запуск КС от свечи, с которыми пусковые характеристики намного хуже.

Осложнение организации рабочего процесса в КС МГТД также связано с тем, что имеется отставание по параметрам термодинамического цикла – π_k и T_r^* .

В [3] было показано, что при уменьшении размеров увеличивается относительная толщина пограничного слоя, которая может привести к перестройке характера течения. Было сделано предположение, что при переходе от обычной к малой размерности каналов и струй КС должен меняться характер течения процессов, следовательно, величина и набор критериев, которые характеризуют эти процессы. Если изменения нет, то следует говорить лишь об изменении размеров, но не размерности.

Отсюда следует, что на данный момент остается лишь один принцип, закладываемый в формировании критерия размерности КС.

Также в [3] была проведена проверка предположения о том, что существует граница, при переходе через которую при моделировании КС в сторону уменьшения её размеров нарушаются известные взаимосвязи основных показателей её рабочего процесса. В конечном итоге было выявлено, что начиная с некоторых размеров КС при их дальнейшем уменьшении нарушается пропорциональность во взаимосвязи параметра цикла ГТД – π_k и оптимальных условий организации рабочего процесса в КС – $\tau_{пр}$.

Были выделены составляющие, которые по технологическим и функциональным причинам имеют пределы минимизации своей величины: технологические допуски на размеры всех элементов КС; размеры каналов для подачи топлива; размеры смесительных элементов – горелок (следовательно, и шаг между ними в окружном направлении); зазоры между подвижными элементами; диаметр капель топлива; толщина газовой завесы около стенок жаровой трубы (ЖТ); неравномерность распределения параметров и веществ по сечению жаровой трубы.

Основные нагрузки для жаровой трубы – тепловые, вызываемые неравномерностью нагрева стенок. Учет неравномерности распределения температур у стенок и определение термических напряжений представляет собой сложную задачу. До настоящего времени надежного расчета КС не существует вследствие больших трудностей теоретического анализа рабочего процесса. Поэтому КС создаются в основном путем их длительной экспериментальной отработки и доводки на специальных установках или непосредственно на двигателях.

КАМЕРА СГОРАНИЯ ГТД-350 И ЕЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящий момент вертолет Ми-2 является основным и единственным вертолетом малой авиации. Замена на новые вертолеты “Ансат” невозможна по причине наложенных на экспорт зарубежных двигателей санкций. По этой причине Ми-2 будет оставаться главным вертолетом в своей нише для постсоветских стран. С учетом того, что новые двигатели не производятся, а замена на восстановленные не всегда возможна, требуется изучить проблему одного из изделий первой категории, а именно – жаровой трубы, находящейся в дефиците у АРЗ стран СНГ.

На двигателе ГТД-350 применена индивидуальная камера, которая представляет собой отдельный, самостоятельный узел. К преимуществам такой камеры относятся простота экспериментальной доводки вследствие относительно небольших размеров, возможность быстрого снятия ее в условиях эксплуатации для ремонта или осмотра, не разбирая самого двигателя. Недостатками индивидуальных камер по сравнению с другими типами камер являются следующие: увеличение массы двигателя, нерациональное использование объема между компрессором и турбиной (в блочной схеме), что приводит к возрастанию габарита двигателя по диаметру и к повышению неравномерности температурного поля по окружности выходных патрубков, усложняет конструкцию соединительных патрубков КС и вызывает необходимость установки газосборника перед сопловым аппаратом турбины.

Все элементы КС собираются в отдельный, независимый от общей сборки узел и в собранном виде устанавливаются в двигатель. Именно на данном двигателе был впервые использован метод поузловой доводки.

Жаровая труба работает в чрезвычайно тяжелых условиях. Она находится под воздействием потока газа с высокой температурой, доходящей на отдельных участках до

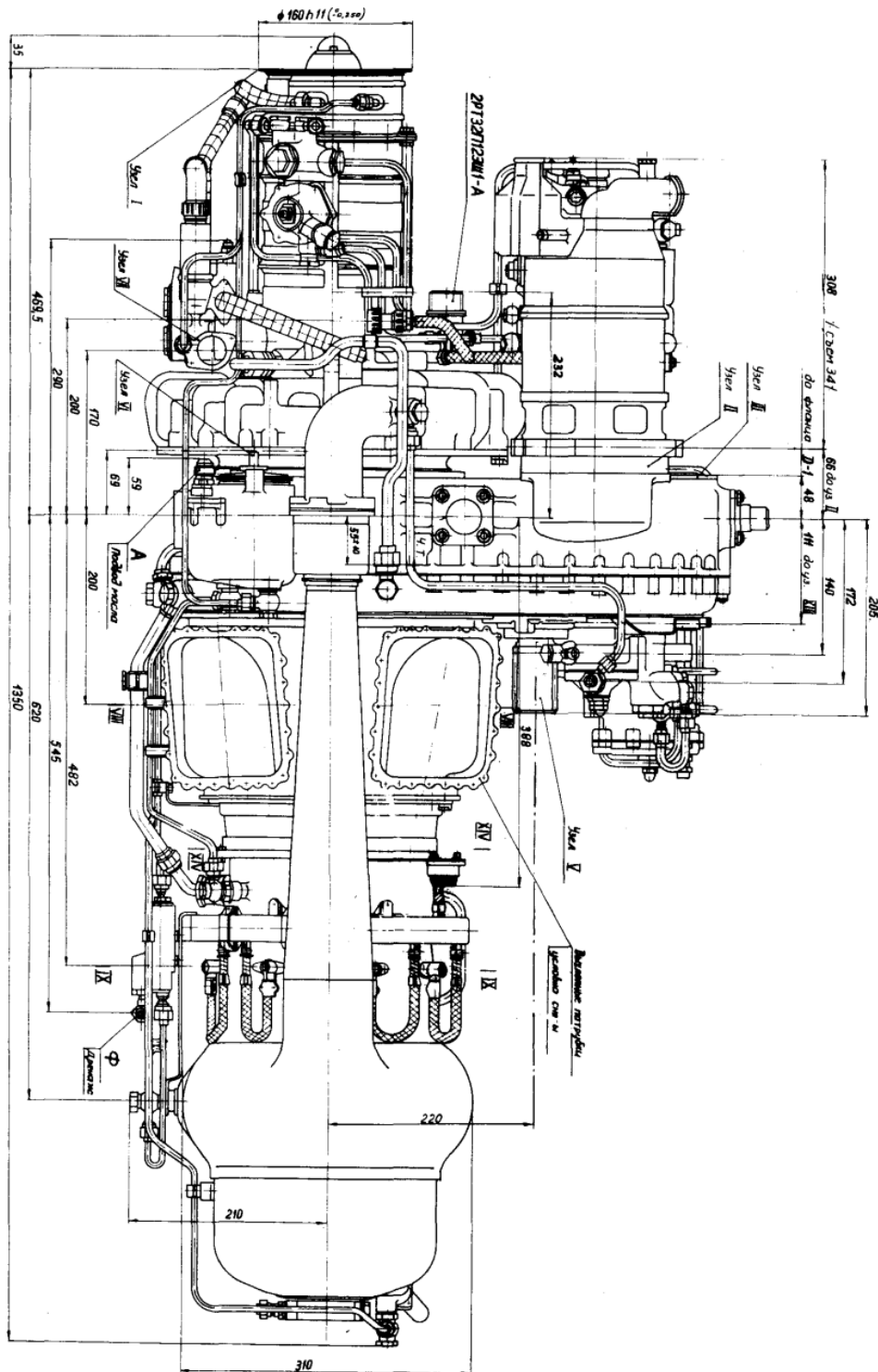


Рис. 1. Габаритный чертеж ГТД-350 [4]

800 – 1000°C. Наиболее сильно нагревается средняя часть жаровой трубы, так как в ней заканчивается горение и только начинается смешивание газов.

Одной из главных проблем в настоящее время являются так называемые “пузыри”, показанные на рис. 3, появляющиеся в основном после переработки межремонтного ресурса, доводя двигатель до предельного состояния без возможности восстановления. Опасность данного дефекта заключается в том, что о нем можно узнать только в процессе разборки при выполнении ремонтных работ. Причиной такой переработки может служить несоответствующее

исполнение правил по эксплуатации. Из-за отсутствия производства камер сгорания авиаремонтные заводы (АРЗ), ремонтирующие данную модель, заменяют на другую, которая использовалась на списанном АД или ГТД. Ремонт может быть долгосрочным из-за отсутствия КС на АРЗ, которым заменяют, что также может стать причиной отказа ремонта в нужный момент.

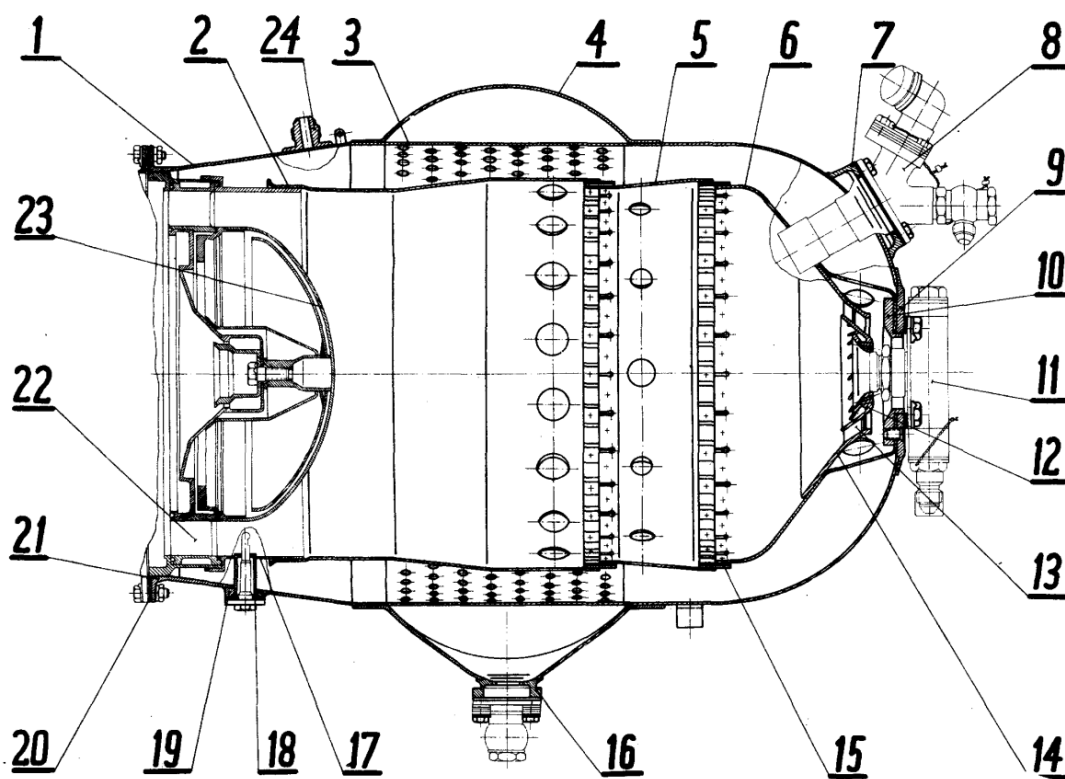


Рис. 1. Камера сгорания ГТД-350:

1 – корпус камеры сгорания; 2 – жаровая труба; 3 – перфорированная решетка; 4 – улитка; 5 – секция; 6 – фронтное устройство; 7 – фланец; 8 – воспламенитель; 9 – фланец; 10 – фланец; 11 – форсунка; 12 – завихритель; 13 – лопатка; 14 – наружная обойма; 15 – гофрированная лента; 16 – фланец; 17 – корпус соплового аппарата, турбины компрессора; 18 – втулка; 19 – фланец; 20 – фланец; 21 – фланец; 22 – канал; 23 – облекатель; 24 – штуцер [4]

Нагар появляется и скапливается из-за препятствующего перед ним пускового воспламенителя, который затрудняет плавный поток в зоне горения. Нагар встречается в 85-90% случаях именно там. В остальных случаях – разрушение эмалевого покрытия из-за пережога по цилиндрической части, в которых также может быть вздутие (5%). Местный перегрев в области нагара может вызывать вздутие, приводящее к увеличению объема, соответственно уменьшению плотности материала.

Наиболее массовым (около 100% разборок) является появление трещин и их дальнейший рост в зоне сварки секций между собой.

Стоит отметить, что помимо этих дефектов существуют также и ещё два – усталостные трещины в области газосборника и выходом из строя уплотнения одной из опор двигателя вследствие закоксовывания. Такое количество проблем связано с недостатками в проектировании. Это может быть вызвано неправильным расчетом температурных градиентов, неправильной геометрией или неправильным выбором материалов. Также возможно, что проблема может быть связана с неправильным обслуживанием и эксплуатацией двигателя. В целом для решения этой проблемы необходимо провести более тщательный анализ конструкции и технологии производства КС и других узлов, чтобы определить и устранить возможные причины, ведь Ми-2 на сегодняшний момент является основным вертолетом в малой авиации стран СНГ.



Рис. 3. Пузыри и трещины камеры сгорания ГТД-350, отмеченные белой окружностью

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены проблемы проектирования КС МГТД, газотурбинного двигателя ГТД-350, используемого на Ми-2. Данные проблемы приводят к нарушениям работы камеры сгорания в полете, что влечет за собой уменьшение мощности двигателя, а также приводит к увеличению расхода топлива. При этом значительно увеличивается температура газа перед турбиной. Данные дефекты могут повлиять на возникновение пожара.

Авиаремонтные заводы стран СНГ (например АРЗ №406, являющийся самым главным по ремонту Ми-2) новые двигатели не получают и в случае замены, занимаются восстановлением старых двигателей.

ГТД-350 является уже давно разработанным и производившимся газотурбинным двигателем. На данный момент производство новых ГТД-350 не является основным направлением в

отрасли авиадвигателестроения, поскольку этот двигатель устарел и большинство вертолетов Ми-2, которые его используют, уже выведены из эксплуатации.

Однако, возможно, что в каких-то ограниченных случаях может потребоваться производство новых ГТД-350, например, для замены старых изношенных двигателей на существующих вертолетах Ми-2. В таком случае производство новых ГТД-350 может быть начато на заказ у специализированных предприятий по производству авиадвигателей. Возможно, по этой причине в скором времени начнут производство изделий первой категории (жаровые трубы, газосборники, сопловые аппараты), являющиеся главным дефицитом для данного двигателя.

Для дальнейшего развития данной темы рекомендуется произвести термогазодинамический расчет камеры сгорания, рассмотреть изменения конструкции в пределах имеющихся габаритов.

Автор выражает благодарность бывшему инженеру Красильникову Герману Венедиктовичу авиаремонтного завода №406 г. Актобе за предоставленную информацию и литературу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов И.В., Ломазов В.С., Разработка малоразмерных ГТД различного типа на базе унифицированного газогенератора databases [Электронный ресурс]. URL: [https:// www.ciam.ru/upload/iblock/667/667bf7b065f498335dd5511509f85be1.pdf](https://www.ciam.ru/upload/iblock/667/667bf7b065f498335dd5511509f85be1.pdf) (дата обращения 15.03.2023).
2. Riddlebaugh S.H., Norgren C.T. Исследование характеристик камеры сгорания малоразмерного двигателя, имеющей различные топливные форсунки // Новое в зарубежном авиадвигателестроении. -М.: ЦИАМ. 1986. № 10. - С.12–16.
3. Лукачев В. П., Ланский А. М., Абрашкин В.Ю., Диденко А.А., Зубков П.Г., Ковылов Ю.Л., Матвеев С.Г., Цыганов А.М., Шамбан М.А., Яковлев В.А. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности. Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара, Машиностроительное конструкторское бюро "Гранит", г. Москва С. 11–13
4. Техническое описание конструкции двигателя ГТД-350 (3-я серия). - С. 10, 20.

ОБ АВТОРАХ

КАИРГАЛИУЛЫ Алиби, маг. каф. АД. Дипл. Инженер ДЛА (УГАТУ, 2022). Готовит НИР о причинах появления дефектов в камере сгорания ГТД-350 и возможных решениях.

METADATA

Title: Small-size combustion chamber design problems on the example aircraft engine "GTD-350"

Authors: A. Kairgaliuly¹

Affiliation: Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ vengector@gmail.com

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (28), pp. 71-77, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The problems are explored and associated with the combustion chamber of the GTD-350 aircraft gas turbine engine, which is used on the Mi-2 helicopter. The reasons are described for the relevance of these problems, and also considers possible ways to solve them, including defects on the flame tube that may occur after engine processing. In addition, the article describes in detail the causes of problems associated with the design of small-sized gas turbine engines, making it clear why this type has been little studied in Russia. Arguments are given in the direction of studying this type of engines.

Key words: small-sized gas turbine engine; SGTE; design; problems; the combustion chamber; CC; helicopter; Mi-2; GTD-350; flame tube; defects; factors; development of SGTE.

About authors:

KAIRGALIULY Alibi, Master of Science (MSc) Student, Dept. of Aircraft Engines. Engineer of Aircraft Engines (UGATU, 2022).