**Проект**

**«Газотурбинные двигатели: физические основы,**

**история создания и применения в России»**

**Выполнил Урванцев Михаил, школа 1574, класс 11 т.**

**Москва, 2023**

Содержание

**Введение****………………………………………………………………………… 3**

**Глава 1. Теоретические основы газотурбинных двигателей (ГТД)…………. 4**

**1.1. Принцип работы ГТД………………………………………………………. 4**

**1.2. Основные характеристики ГТД……………………………………………. 7**

**1.3 Сферы применения ГТД в технике……………………………………….... 9**

**Глава 2. История технологического развития ГТД в России и за рубежом…. 11**

**2.1. Газотурбинные двигатели в 18-20 вв. …………………………………… 11**

**2.2. ГТД в 21 веке в современной России………………………………………14**

**Глава 3. Перспективы разработки и использования ГТД**

**в современной России……………………………………………………………15**

**3.1. Разработка перспективных ГТД в РФ………………………………………15**

**3.2. Применение ГТД в газотурбовозах на железнодорожном транспорте ... 18**

**Заключение ...…………………………………………………………………… 19**

**Список литературы и электронных источников……………………………… 21**

**Введение**

**В течение нескольких последних веков деятельность многих умов человечества была направлена на использование возможностей природы для получения тех или иных полезных результатов. В частности, эта деятельность началась с создания первых паровых машин (Иван Ползунов в России на Алтае, немного позднее – Дж. Уатт в Англии). В основе этой машины было преобразование энергии пара воды в энергию движения.**

**В последующие годы и десятилетия активно развивались исследования и технические решения, направленные на использование других источников замены пара и развития технических устройств движения с целью повышения эффективности и расширения сферы применения технических систем.**

**Таким образом, в историческом аспекте была выстроена цепочка от простых паровозов к тепловым электростанциям, двигателям внутреннего сгорания (автомобили), реактивным и турбореактивным двигателям с разнообразными сферами применения. В основе всех таких технических устройств лежит преобразование одного вида энергии в другие. Главное при этом всегда заключается в том, насколько эффективно исходная энергия преобразуется в необходимую, то есть, насколько минимальны потери этой энергии (КПД).**

**Тему проекта я выбрал самостоятельно.**

***Тема проекта заинтересовала меня* тем, что, как мне было известно, ГТД используются в современных самолетах, локомотивах, танках, и важно было, прежде всего, выяснить и понять физические основы работы такого двигателя. Кроме того, интерес также вызвали история и перспективы применения в России.**

***Актуальность темы* данного проекта заключается в том, что стратегия развития современной России направлена на научно-техническое развитие и импортозамещение, в том числе, в сфере разработки и применения наиболее эффективных видов двигателей в технике.**

**Стратегия развития России и, особенно, последние решения Президента и Правительства, направлены на развитие транспортной инфраструктуры:**

* **развитие сети автомобильных и железных дорог,**
* **развитие сети крупных и мелких современных аэропортов,**
* **развитие Северного морского пути.**

**Важнейшим направлением в решении этой проблемы является необходимость создания и насыщения народного хозяйства современными транспортными средствами: автомобилями, локомотивами, самолётами кораблями и гражданскими судами.**

**Всё это требует новых эффективных двигателей. И одним из важнейших вариантов этих решения являются ГТД.**

***Проблема по теме проекта* состоит в следующем. Газотурбостроение в последние 10 лет зарекомендовало себя как одно из эффективных направлений в технике, которое в современных условиях необходимо активно развивать. Тем более в РФ есть для этого хороший задел в науке, в сфере создания новых материалов и конструкций двигателей, доступность добычи экологичного газового топлива, внедрение новых технологий сжиженного газа, нацеленность на импортозамещение в машиностроении, включая двигателестроение.**

***Цель проекта:*  выяснить физические основы ГТД и проанализировать состояние и перспективы применения ГТД в технике в России (на основе учета** **теоретического, а также исторического, экологического и практического аспектов) с использованием учебной и научной литературы и актуальных электронных источников.**

***Задачи проекта:***

**1.** **Изложить теоретические основы ГТД.**

**2. Представить краткий исторический очерк по теме проекта.**

**3. Выявить перспективы применения ГТД в России, в том числе, на примере железнодорожного транспорта.**

***Методы исследования*:**

***-* Подбор литературных и электронных источников по теме проекта.**

**- Метод сравнения актуальной информации.**

**- Комплексный метод исследования на основе учета множества важных факторов, включая теоретический, исторический, экологический и практический аспекты.**

***Структура проекта* включает введение, три главы, заключение, список литературы и электронных источников (1-13). Объем текста проекта составляет 22 страницы.**

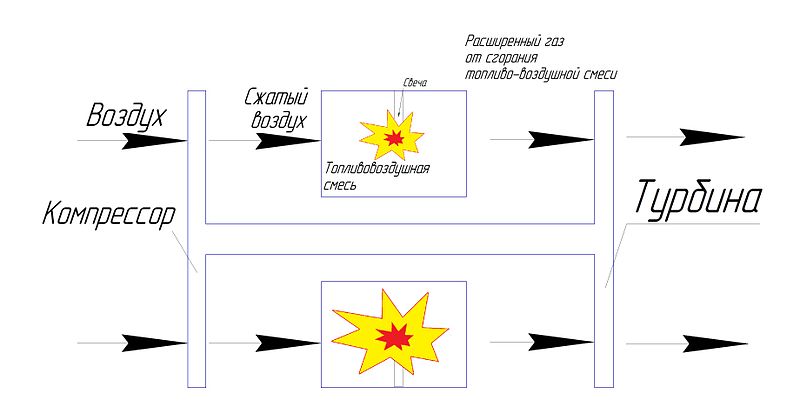
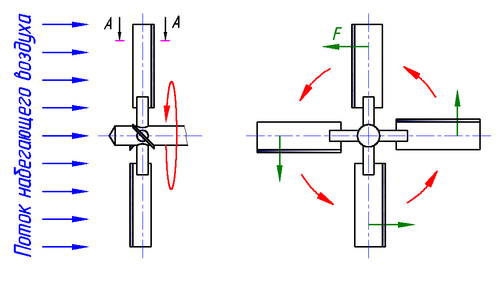
**Глава 1. Теоретические основы ГТД**

**1.1. Принцип работы ГТД**

Что такое ГТД? Этот вопрос обсуждается в большом количестве монографий и учебных пособий, а также в учебных курсах многих технических вузов России, где есть специальности, связанные с разработкой и эксплуатацией двигателей.

Из учебника [1] я выяснил, что ГТД – это тепловой двигатель с термодинамическим циклом, использующий газ в качестве рабочего тела для превращения теплоты в механическую работу на валу газовой турбины. Назначение такого двигателя – сферы техники, требующие большую мощность при малых массогабаритных характеристиках.

Рабочий процесс ГТД может осуществляться с непрерывным сгоранием топлива при постоянном давлении или с прерывистым сгоранием топлива при постоянном объёме (Рис.1).

**Рис.1. Простейшая схема устройства ГТД.**

**Слева – принципиальная схема ГТД, справа - схема турбины с лопаточками.**

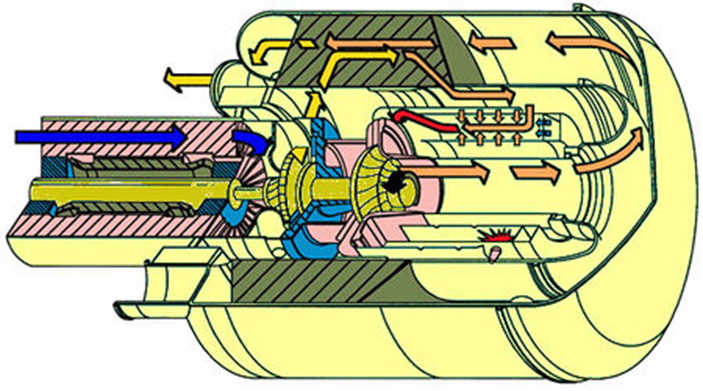
Принцип работы, основные разновидности ГТД, их отличие, составные агрегаты и базовые характеристики хорошо изложены в монографиях и учебниках [1 - 4].

***Компрессор* через входной патрубок всасывает воздух и сжимает его до определенного давления. Воздух с повышенным давлением поступает в камеру сгорания, куда через форсунку непрерывно подается топливо.**

***Топливо в камере сгорания* перемешивается с воздухом и сгорает при практически постоянном давлении. При сгорании топлива образуются горячие газы, которые направляются в проточные части газовых турбин. В газовых турбинах энергия продуктов сгорания преобразуется в направляющих лопатках в кинетическую энергию потока газа (газ разгоняется до больших скоростей), а затем кинетическая энергия газа преобразуется в рабочих лопатках в механическую энергию вращения ротора.**

**Простейшая схема устройства ГТД изображена на Рис. 2, которую также можно найти в ИНТЕРНЕТЕ на сайте** Википедия в разделе «Газотурбинный двигатель» **[6].**

**Очень наглядно на сайте** «Как это работает» в разделе «Принцип работы газотурбинного двигателя» представлена **Принципиальная схема рабочего процесса ГТД [5].**

****

**Рис.2. Принципиальная схема рабочего процесса ГТД.**

***Турбина* приводит во вращение компрессор, находящийся с ней на одном валу (Рис.2). Если в двигателе конструктивно выполнено несколько турбин и компрессоров, то привод каждого компрессора осуществляется от своей турбины.**

***Итак,* *ГТД – это тепловая машина, в которой реализуется термодинамический цикл. В силу закона сохранения энергии, и это очень важно понимать, в процессе этого цикла вырабатываются разные виды энергии (основные - кинетическая, тепловая) и только часть из них двигатель превращает в полезную работу. Чем больше часть полезной энергии, тем двигатель эффективнее.***

**Традиционно авторы сравнивают процессы в ГТД и поршневых двигателях внутреннего сгорания. В классической монографии** Иноземцева А.А. и Сандрацкого В.Л. «Газотурбинные двигатели» **[3]** хорошо представлено отличие ц**иклов работы ГТД и поршневых двигателей внутреннего сгорания, которые хотя и состоит из тех же основных процессов, но имеют существенное отличие.**

**В поршневых двигателях процессы происходят последовательно, такт за тактом, в одном и том же элементе двигателя – цилиндре. В ГТД эти же процессы происходят одновременно и непрерывно в различных элементах двигателя. Благодаря этому, в ГТД нет такой неравномерности условий работы элементов двигателя, как в поршневом, а средняя скорость и массовый расход рабочего тела в 50…100 раз выше, чем в поршневых двигателях. Это позволяет (как отмечал академик** А. М. Люлька**) сосредоточить в малогабаритных ГТД большие мощности, что и соответствует основной идее ГТД – создать двигатель, имеющий большую мощность при малых массогабаритных характеристиках.**

**Очень важно, что *в большинстве ГТД*** ***реализуется одинаковый термодинамический цикл, обычно называемый простым газотурбинным циклом или циклом Брайтона,* поэтому при рассмотрении ГТД как тепловой машины можно отвлечься от конкретного типа и назначения двигателя*.***

**Простой цикл состоит из следующих термодинамических процессов:**

**- *сжатие рабочего тела (воздуха)* в воздухозаборнике и в компрессоре от атмосферного давления до требуемого. В наземных ГТД динамическое сжатие в воздухозаборнике отсутствует, и весь процесс сжатия осуществляется в компрессоре;**

**- *подвод тепла* при постоянном давлении к потоку рабочего тела в камере сгорания за счет сгорания топлива;**

**- *расширение продуктов сгорания* в турбине и сопле от требуемого до атмосферного давления. Для вертолетных и наземных ГТД расширение газа в турбине происходит до атмосферного давления.**

**- *отвод тепла* к внешнему источнику (в атмосферу) при постоянном давлении.**

**Сложным циклом называют цикл, содержащий дополнительные термодинамические процессы подогрева в процессе расширения, охлаждения в процессе сжатия, утилизации тепла выхлопных газов и др.**

**Реальный газотурбинный цикл ГТД отличается от идеального наличием, в частности, гидравлических потерь во всех элементах двигателя. Это подробно обсуждается в монографии** Казанджана П.К., Тихонова Н.Д. и Шулекина В.Т. «Теория авиационных двигателей» **[4]. Реальный цикл является разомкнутым, т.к. в дальнейшем выхлопные газы не участвуют в периодически совершаемой работе и не попадают на вход в двигатель. Цикл осуществляется рабочим телом с переменной теплоемкостью и химическим составом. Является переменным и расход рабочего тела из-за добавки топлива в камере сгорания во время цикла.**

**1.2. Основные характеристики ГТД**

**Базовые знания о тепловом двигателе мы формируем уже в школе. Как известно из учебника физики, любой тепловой двигатель превращает в механическую энергию только незначительную часть энергии, которая выделяется топливом. Большая часть энергии топлива не используется полезно, а теряется в окружающем пространстве (Перышкин, 8 класс).**

**Тепловой двигатель состоит из нагревателя, рабочего тела и холодильника. Газ или пар, который является рабочим телом, получает от нагревателя некоторое количество теплоты. Рабочее тело, нагреваясь, расширяется и совершает работу за счёт своей внутренней энергии. Часть энергии передаётся атмосфере — холодильнику — вместе с отработанным паром или выхлопными газами.**

**Очень важно знать, какую часть энергии, выделяемой топливом, тепловой двигатель превращает в полезную работу. Чем больше эта часть энергии, тем двигатель эффективнее. Для характеристики эффективности различных двигателей введено понятие коэффициента полезного действия двигателя — КПД. КПД теплового двигателя называется отношение совершённой полезной работы двигателя к энергии, полученной от нагревателя. КПД** **теплового двигателя η (греч. буква «эта») определяют по формуле (Рис.3).**

**,**

**где Ап — полезная работа, Q1 — количество теплоты, полученное от нагревателя, Q2 — количество теплоты, отданное холодильнику, Q1 — Q2 — количество теплоты, которое пошло на совершение работы. *КПД двигателя обычно выражают в процентах. Он всегда меньше единицы, т. е. меньше 100%.***

**Рис.3. КПД теплового двигателя.**

**Таким образом, в силу *закона сохранения энергии* и в результате неустранимых потерь энергии КПД реальных двигателей всегда меньше единицы, то есть невозможно получить полезной работы больше или столько, сколько затрачено энергии.**

В электронном источнике [12] приводится сравнение показателей, в т.ч. КПД поршневого и газотурбинного двигателей, которое является качественным, так как для конкретных видов двигателей показатели будут строго индивидуальными (табл.).

Таблица.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Показатель | Тип двигателя | |
| Поршневой | Газотурбинный |
| Диапазон единичных мощностей двигателей (ISO), МВт | 0.1 — 16.0 | 0.03 — 265.0 |
| Влияние температуры наружного воздуха на мощность двигателя | Практически не влияет | При снижении температуры до -20°C мощность увеличивается примерно на 10-20%, при повышении до +30°C — уменьшается на 15-20% |
| Влияние температуры наружного воздуха на КПД двигателя | Практически не влияет | При снижении температуры до -20°C КПД увеличивается примерно на 1.5%. |
| КПД по выработке электроэнергии при работе на газе (ISO) | от 31% до 48% | В простом цикле от 25% до 38%, в реальном — от 41% до 55% |

**В учебной литературе для высшей школы [1,2,8] основные показатели ГТД (авиационных, наземных и морских) определяются профессионально следующим образом.**

**Так, основными показателями цикла авиационных ГТД являются:**

**- *удельная работа (работа, отнесенная к 1 кг рабочего тела)***

**- *эффективный КПД – отношение работы цикла к количеству теплоты, подведенному с топливом к камере сгорания.***

**Параметрами реального цикла, определяющими уровень его указанных выше основных показателей, являются температура газа перед турбиной, суммарная степень сжатия, расход циклового воздуха на охлаждение турбины.**

**Одновременное повышение температуры перед турбиной и степени сжатия является наиболее эффективным способом повышения КПД и удельной работы цикла.**

**К основным параметрам наземных и морских ГТД относятся эффективная мощность и эффективный КПД на выходном валу.**

***Удельная мощность – это мощность, приходящая на единицу (1кг/с) расхода воздуха.* Мощность таких ГТД измеряется от 30 кВт до 350 МВт.**

***Эффективный КПД* для наземных и морских ГТД характеризует топливную эффективность и представляет собой отношение эффективной мощности на валу к мощности, подведенной с топливом. Повышение эффективного КПД является важнейшим направлением развития ГТД.**

**Масса и габариты для наземных и морских ГТД имеют второстепенное значение. Исключение составляют транспортные ГТД.**

**Параметры цикла влияют и на *экономическую эффективность* – удельную стоимость ГТД (экономический параметр, характеризующий стоимость 1 кВт мощности ГТД).**

**1.3. Сферы применения ГТД**

**ГТД широко применяются в современной технике и в разных отраслях народного хозяйства [6,7,10,13]:**

**- *авиационной* (самолеты, вертолеты, крылатые ракеты, беспилотные летательные аппараты);**

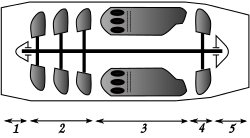
**- *наземной (в энергетике, промышленности и на транспорте*: механический привод промышленного оборудования – нагнетатели, компрессоры, насосы; энергетический привод: привод энергогенераторов в составе объектов энергетики; привод транспортных средств и боевой техники: локомотивов, автомобилей, танков, бронемашин и т.д.);**

**- *морской* (привод движителей морских судов, боевых кораблей, судов на воздушной подушке; привод на морских платформах добычи нефти и газа, на прибрежных объектах; экранопланах).**

**В настоящее время по данным разных источников на начало 2023 года авиационные двигатели в *общем объёме мирового производства* ГТД в стоимостном выражении составляют около 70%, наземные и морские – примерно 30%. Объём производства наземных и морских ГТД распределяется следующим образом: энергетические ГТД ~ 91%; ГТД для привода промышленного оборудования и наземного транспорта ~ 5%; ГТД для привода судовых движителей ~ 4%.**

**Основным типом двигателя, который в настоящее время применяется в гражданской авиации, является газотурбинный двигатель [2,5]. Возможны следующие *виды авиационных ГТД* [6]:**

**- турбореактивный двигатель (ТРД)(Рис.4);**

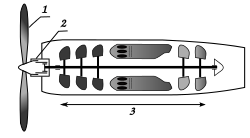
[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TRD-schema.svg?uselang=ru)

**1 — входное устройство; 2 — осевой компрессор; 3 — камера сгорания; 4 — рабочие лопатки турбины; 5 — сопло.**

**Рис.4. Принципиальная схема одноконтурного ТРД.**

**Контуров может быть 2-3 (ТРДД). Область применения ТРД — любые самолёты от дозвуковых гражданских до сверхзвуковых боевых.**

**- турбовинтовой двигатель** **(ТВД)** **(Рис.5);**

[](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TVD-schema.svg?uselang=ru)

**1 — воздушный винт; 2 — редуктор; 3 — турбокомпрессор**

**Рис.5. Принципиальная схема** **ТВД.**

**ТВД гораздо более экономичны на малых скоростях полёта и широко используются для самолётов, имеющих большую грузоподъёмность и дальность полёта — например, Ан-12, Ан-22, C-130. Крейсерская скорость самолётов, оснащённых ТВД, 500—700 км/ч.**

**- турбовальный двигатель (ТВаД).**

**В отличие от всех остальных типов ГТД, турбовальный двигатель не создаёт реактивной тяги, его выхлопное устройство не является соплом, а вся полезная мощность снимается в виде вращения выходного вала. Основное применение двигатель находит в авиации — на вертолётах, в судостроении — на газотурбоходах; в электроэнергетике на газотурбинных ТЭЦ; на насосных станциях для перекачки природного газа; применяется на железнодорожном транспорте — на газотурбовозах.**

**ТВаД были установлены на советском танке Т-80 (двигатель ГТД-1000Т) и американском М1 Абрамс. Т-80, однако, в отличие от советских танков, двигатели Абрамс забиваются песком в условиях пустынь.**

**В *автостроении* ГТД используются в гоночных автомобилях, но в городских условиях пока не получили широкого применения в силу специальных требований к конструкции, температурам, экономичности и экологичности.**

**Требования, предъявляемые к двигателям военного и гражданского назначения, достаточно сильно отличаются. Для военных двигателей самыми важными требованиями являются живучесть и необходимость функционирования на экстремальных режимах; для коммерческих же – надежность и экономичность [2].**

**Глава 2. История создания и применения газотурбинных двигателей (ГТД) в технике в России и за рубежом**

**2.1. Газотурбинные двигатели в 18-20 вв.**

Разработкой ГТД занимались и занимаются в разных странах, особенно в Германии и Англии. Однако, следует отметить достойный вклад русских учёных и инженеров в создание и развитие газотурбинной техники [1,2,6,10,11,13].

Впервые *идею* создания ГТД с газогенератором, поршневым компрессором, камерой сгорания и газовой турбиной *предложил* в 1791 английский изобретатель Дж. Барбер. Начиналось научно-техническое развитие двигателестроения в технике.

Русский инженер П. Д. Кузьминский в 1892 разработал проект, а в 1900 *построил ГТД* со сгоранием топлива при постоянном давлении, предназначенный для небольшого катера. В этом ГТД была применена многоступенчатая газовая турбина. Но испытания не были завершены из-за смерти Кузьминского. В 1906 русский инженер В. В. Караводин спроектировал, а в 1908 построил бескомпрессорный ГТД с 4 камерами прерывистого сгорания и газовой турбиной, который при 10 000 об/мин развивал мощность 1,2 кВт (1,6 л. с.).

В 1908 по проекту немецкого инженера Х. Хольцварта был построен ГТД прерывистого горения. К 1933 КПД ГТД с прерывистым горением составлял 24%, однако они не нашли широкого промышленного применения.

В России в 1909 инженер Н. В. Герасимов получил патент на ГТД, который был использован им для создания реактивной тяги (турбореактивный ГТД); в 1913 М. Н. Никольской спроектировал ГТД мощностью 120 кВт (160 л. с.) с трёхступенчатой газовой турбиной; в 1923 В. И. Базаров предложил схему ГТД, близкую к схемам современных турбовинтовых двигателей.

В 30-е гг. большой вклад в создание авиационных ГТД внесли советский конструктор А. М. Люлька (академик АН СССР), английский изобретатель Ф. Уиттл, немецкий инженер Л. Франц и др.

В 1939 в Харькове, в лаборатории, руководимой В. М. Маковским, изготовлен ГТД мощностью 736 кВт (1000 л. с.). В качестве топлива использован газ, получаемый при подземной газификации угля. Испытания этого ГТД в Горловке были прерваны Великой Отечественной войной [4].

В 1930 г. во Всесоюзном теплотехническом институте под руководством В.В. Уварова была организована лаборатория «Газовая группа», которой были поручены работы по созданию двигателя, имеющего большую мощность при малых массогабаритных характеристиках - экспериментального ТВД мощностью 1100 кВт (1500 л.с.). В 1934 г. была создана установка ГТУ-1, состоявшая из одноступенчатого центробежного компрессора с воздушной турбиной (вместо диффузора), камеры сгорания и одноступенчатой газовой турбины с внутренним водоиспарительным охлаждением. При таком охлаждении вода подводилась к лопаткам ротора через внутреннюю полость диска, а отводилась в виде пара, что позволило, используя скрытую теплоту парообразования, существенно уменьшить расход теплоносителя.

Таким образом, в СССР еще до Великой Отечественной войны существовал ГТД, испытания которого доказали возможность осуществления мощного, легкого высокотемпературного ТВД, что позволило в 1943-1946 гг. разработать, построить и испытать ТВД 33080 мощностью 736 кВт (1000 л.с.) при температуре газа перед турбиной 1500 К – *первое поколение* ГТД.

В 1946-1949 гг. был создан новый опытный двигатель 33081 эквивалентной мощностью~ 2600 кВт (3500 л.с.). Полученный опыт был использован в дальнейших исследованиях, проведенных под руководством В.В. Уварова, а также при выполнении ряда проектов, например локомотивного ГТД мощностью 2600 кВт (3500 л.с.) (на его основе Л.С. Лебедянский с ведущими конструкторами Б.Н. Мачневым, А.М. Нейманом, 3.И. Нестеровым, Ю.В. Хлебниковым на КТЗ создал (1959) первые отечественные газотурбовозы, которые с успехом эксплуатировались в нашей стране.

После 1945 г. в СССР началось бурное развитие авиационного газотурбостроения.

Большой подъем в отечественном газотурбостроении наметился, начиная с 1950-х годов, когда к созданию новых ГТУ приступили коллективы таких крупных заводов, как «Экономайзер» (ныне в составе ОАО «Пролетарский завод») и ЗАО «Уральский турбинный завод», ОАО «Калужский турбинный завод».

В середине 1950-х гг. создаются двигатели следующего *второго поколения -* наиболее выдающиеся ТРД. В 1966 г. появились высокопараметрические одновальные ТРД в классе тяг 8900 - 11400 кгс, установленные на самолетах Су-17М, МиГ-23Б, Су-24М. В 1960-е и вначале 1970-х годов в эксплуатации появляются ТРДД - двигателям *третьего поколения* с относительно высокими параметрами цикла и охлаждаемой турбиной.

В 1985 г. было реализовано собственное изобретение A.M. Люльки - создан один из лучших военных двигателей АЛ-31Ф с тягой 12500 кгс. Он имел очень высокие параметры цикла, а главное - был двухконтурным.

С середины 1970-х годов по 1990-е годы в СССР созданы выдающиеся двигатели *четвертого поколения* - с большой степенью двухконтурности, а также характеризующиеся высокими параметрами цикла – до 37К в связи с освоением новых технологий и материалов. В середине 1980-х гг. начато создание двигателей *пятого поколения* с капотированным и открытым вентилятором.

Большие успехи были достигнуты в отечественном транспортном газотурбостроении. Так, морской флот нашей страны занимал ведущее место в мире по использованию ГТД.

Выдвинутая еще в предвоенные годы техническая идея А.М. Люльки во второй половине XX века была широко реализована во всем мировом авиадвигателестроении ТРДД стали доминирующими как в гражданской, так и в военной авиации.

Бесспорно, что российские ученые и конструкторы, и прежде всего - Б.С. Стечкин, В.В. Уваров, А.М. Люлька, В.Я. Климов, С.К. Туманский, В.А. Добрынин, Н.Д. Кузнецов, П.А. Соловьев, С.П. Изотов, внесли выдающийся вклад в развитие современного мирового газотурбинного авиадвигателестроения.

С начала 1990-х годов в СССР стало наиболее активно осуществляться проектирование и производство конвертированных авиационных двигателей для энергетики и транспорта газа, что было связано с приоритетной политикой экспорта энергоресурсов.

Вся вышеприведённая информация показывает, что эта отрасль развивается в России не на пустом месте, а имеет богатую историю и большое число известных специалистов, и целые инженерные школы.

**2.2. ГТД в 21 веке в современной России**

Сейчас в России вновь проектируются и выпускают ГТД разного типа и для разных целей.

Характерной особенностью современных ГТД является создание различных типов двигателей на основе одного базового газогенератора, который представляет собой наиболее напряженную часть ГТД, определяющую его надежность. Он включает высоконапорную часть компрессора, высокотемпературную камеру сгорания и турбину высокого давления. На его базе добавлением низконапорного компрессора и турбины низкого давления, а также других узлов могут быть созданы различные типы ГТД [2].

Другой особенностью ГТД в настоящее время, которая связана с использованием концепции базового газогенератора, является создание семейств двигателей [2, 8].

Россия является одной из немногих стран мира, способных самостоятельно разрабатывать и серийно производить авиационные газотурбинные двигатели. «Объединенная двигателестроительная корпорация» (ОДК) и предприятия из ее состава работают над перспективными проектами силовых установок и создают новые технологии их производства. Недавно стало известно о внедрении сразу двух новых изобретений в области изготовления лопаток [10].

В конце 2019 г. в г. Рыбинск на базе предприятия «ОДК-Сатурн» был открыт крупнейший в стране специализированный центр по производству лопаток для газотурбинных двигателей. Продукцию этого центра планировалось использовать в основном при изготовлении отечественных моторов; часть изделий предназначалась для экспорта. В течение нескольких следующих лет производство должно было выйти на максимальную мощность и выдавать 900 тыс. лопаток в год.

Уже в начале апреля 2022 г. «Ростех» сообщил о новых успехах в области двигателей. ОДК разработала и внедряет новые технологии производства лопаток. Предложено новое устройство закрутки лопаток и технология гибридной штамповки лопатки из двухфазного титанового сплава.

Два перспективных изобретения направлены на оптимизацию процесса изготовления. Они позволяют повысить точность и качество производства, а также снизить трудозатраты и исключить участие человека. При этом используемое производственное оборудование и оснастка без затруднений включаются в налаженные технологические процессы.

Новые технологии уже используются при развитии нескольких перспективных проектов двигателей. Кроме того, рыбинский центр «ОДК-Сатурн» освоил новые идеи и теперь использует их в серийном производстве лопаток для существующей линейки двигателей. В будущем он должен будет расширить номенклатуру готовой продукции, выполненной на новых технологиях.

**Глава 3. Перспективы разработки и использования ГТД в современной России**

**3.1. Разработка перспективных ГТД в РФ**

На сайтах [7,9-11,13] приведена актуальная информация о разработках и применении ГТД в разных областях техники и о перспективах в ближайшие годы. Газотурбинное двигателестроение – это отрасль, от которой в критической степени зависит военная, транспортная и энергетическая безопасность страны. ОДК, входящая в Госкорпорацию «Ростех», специализируется на разработке, серийном изготовлении и сервисном обслуживании двигателей для военной и гражданской авиации, ракетной техники, Военно-Морского Флота, а также для нефтегазовой промышленности и энергетики [7].

Двигатель НК-12МП, установленный на Ту-95МС, до сих пор самый мощный и экономичный турбовинтовой двигатель в мире. Производство новых двигателей НК-32 для стратегического бомбардировщика Ту-160 было возобновлено в 2020 году. На истребителях МиГ-29, которыми располагают военно-воздушные силы 25 государств, установлены проверенные временем турбореактивные двигатели РД-33.

В 2021г. разработаны двигатели для гражданской и транспортной авиации: новый российский двигатель ПД-14 для среднемагистрального лайнера МС-21-310, двигатель ТВ7-117СТ-01 для ближнемагистрального пассажирского самолёта Ил-114-300, кроме того, макет газотурбинной установки большой мощности ГТД-110М – новинка стратегического уровня. Это первый российский ГТД, предназначенный для использования в составе газотурбинных энергетических и парогазовых установок большой мощности.

В ОДК продолжаются работы по созданию двигателя пятого поколения для российского истребителя пятого поколения Су-57, который обеспечит полёты Су-57 на сверхзвуковых скоростях в бесфорсажном режиме.

Двигатель ВК-2500П двигатель без доработок может использоваться на любом типе военных вертолётов семейств «Ми» и «Ка».

ОДК создаёт ГТД для строящихся и перспективных кораблей различных классов для ВМФ РФ.

*Работа по импортозамещению* была начата задолго до введения санкций, исходя из того, что газотурбинное двигателестроение – одна из основ технологического суверенитета нашей страны. Причём это касается не только оборонной сферы, но и стратегических гражданских отраслей. Придаётся большое значение выводу на рынок турбины ГТД-110М, первого отечественного продукта в своём классе мощности.

Точно так же первым российским продуктом в своём классе является морской агрегат М55Р на базе двигателя М90ФР. В этом же ряду флагманских отечественных разработок, первых в своём роде, – двигатель ПД-14. Старт этой разработке был дан раньше санкционных событий.

Подготовка к серийному производству вертолётных двигателей также началась задолго до введения санкций. В 2014 году в Санкт-Петербурге была построена новая производственная площадка. В дополнение к компетенциям по разработке двигателей, которые изначально имелись у «ОДК-Климов», было запущено их серийное производство и сервисное обслуживание.

Уже в 2015 году корпорация приступила к выпуску самых распространённых двигателей семейства ВК-2500 на замену запорожским двигателям. Сегодня это наиболее популярная вертолётная силовая установка не только в России, но и за рубежом. Всего за пять лет было выпущено более 600 российских двигателей. Причём это существенно модернизированный продукт – первая цифровая система автоматического управления вместе со счётчиком наработки была внедрена именно в конструкцию двигателя ВК-2500.

По всему миру рынки пилотируемой фронтовой авиации в прогнозах демонстрируют тенденцию к снижению. Прежде всего – за счёт перетекания спроса в беспилотный сегмент.

Развитие беспилотной авиации – одно из приоритетных направлений ОДК. В соответствии с решениями Военно-промышленной комиссии в ближайшее время должен быть актуализирован типоразмерный ряд газотурбинных двигателей для БпЛА, включая основные технические требования и потребность в объёмах производства.

В беспилотной сфере нужно стремиться к тому, чтобы максимально использовать существующие двигатели и их адаптации. В целом, какой двигатель мы ни возьмём – ВК-650В, АЛ-55, АИ-222-25, РД-33/93, везде есть интересные возможности и концепции с точки зрения применения на беспилотниках.

Первая ниша – это скоростные беспилотники, которые должны действовать в связке с пилотируемыми авиационными комплексами. Другая ниша – высотные и средневысотные беспилотники для контроля обстановки в различных районах, например, в Арктике.

Электрификация силовых установок открывает новые возможности для развития летательных аппаратов. Она будет иметь существенные преимущества по удельному расходу топлива и воздействию на экологию, повысит надёжность силовой установки, что, в свою очередь, позволит расширить спектр применения однодвигательных аппаратов. Позволит улучшить скоростные характеристики вертолётов. В пассажирской и транспортной авиации может обеспечить существенное улучшение взлётно-посадочных характеристик, а также решение проблемы ограничений по шуму, особенно в населённых пунктах, где небольшие взлётно-посадочные полосы расположены в черте города.

Электродвижение – это новое для ОДК направление. Поэтому для нас важно максимально использовать уже наработанный в отечественной прикладной науке задел.

По данным «Ростеха», новые технологии производства уже используются при изготовлении турбореактивных двигателей ПД-8, ПД-14 и ПД-35. Эти изделия имеют разные технические характеристики, и это показывает универсальность и потенциал новых изобретений ОДК.

Названные двигатели предназначаются для ряда моделей и модификаций современных и перспективных самолетов. Так, ПД-14 разных версий используется в проекте среднемагистрального лайнера МС-21 и его вариантах. Также рассматривается возможность его использования в новой версии самолета Ту-204 или при модернизации других существующих образцов.

Перспективный ПД-8 планируется использовать на новых модификациях ближнемагистрального SSJ и многоцелевого Бе-200, выполняемых с учетом импортозамещения. Не исключается его внедрение на других типах в качестве замены недоступных изделий. Буквально накануне было объявлено о завершении стендовых испытаний такого двигателя. Вскоре начнутся новые испытания на автономных установках и летающих лабораториях, что приближает старт серийного производства и установки на самолетах.

Наиболее мощный двигатель ПД-35 планируют использовать в перспективных проектах дальнемагистральных широкофюзеляжных лайнеров. Уже проводятся испытания и отработка отдельных агрегатов такого двигателя. При этом самолеты под него еще не создаются. В этом случае работа ведется с прицелом на отдаленное будущее.

**3.2.** **Применение ГТД в газотурбовозах на** **железнодорожном транспорте**

Перед **железнодорожным транспортом в России вновь стоят большие задачи [9].**

Локомотивы, на которых стоят турбовальные газотурбинные двигатели, называются газотурбовозами (разновидность тепловоза). На них используется электрическая передача. ГТД вращает электрогенератор, а вырабатываемый им ток, в свою очередь, питает электродвигатели, приводящие локомотив в движение.

Еще в 1960-е годы созданные в СССР газотурбовозы проходили довольно успешную опытную эксплуатацию, но электровозы получили большое распространение, т.к. КПД газовой турбины был значительно ниже, чем у дизеля — существовавшие тогда материалы не позволяли повысить температуру сгорания газов, кроме того, этот коэффициент еще более снижался на режимах малой мощности и переменных нагрузок, а также при высокой температуре охлаждающего воздуха.

В 2007 году по инициативе ОАО «РЖД» был изготовлен ГТ1 — самый мощный газотурбовоз в мире, при этом он первый работающий на сжиженном природном газе, и это отличный повод гордится за Воронежский тепловозоремонтный завод, на котором он был разработан и внедрен. Мощность ГТД кВт (л.с.) - 8300 (11290). Затем были построены: в 2009 г. ГТ1-001, работающий на газообразном топливе, и в 2013 г. ГТ1h-002, который является гибридным — он оборудован блоком аккумуляторных батарей, которые могут использоваться для проведения маневровых работ без запуска турбинного двигателя (Рис.6).



Рис.6. Газотурбовоз ГТ1h-002 [13].

Еще в 2016 году ПАО «Газпром», ОАО «Российские железные дороги», АО «Группа Синара» и ЗАО «Трансмашхолдинг» [11] начали сотрудничество в области использования газомоторного топлива. «Газпром», прежде всего, построит современные объекты газозаправочной инфраструктуры в местах, согласованных с «РЖД», а также будет обеспечивать заправку подвижного состава сжиженным природным газом. Синара отвечает за магистральные газотурбовозы, Трансмашхолдинг — за маневровые газотепловозы. Стороны соглашения договорились о синхронизации этапов развития парка газомоторных локомотивов и инфраструктуры для их заправки и технического обслуживания.

В связи с развитием железнодорожного машиностроения в России в январе 2021 года главный инженер ОАО «РЖД» Сергей Кобзев определил, что крупным направлением работы являются локомотивы на природном газе.

К 2030 году РЖД планируют запустить газомоторные маневровые и магистральные локомотивы на природном газе по Северному широтному ходу и на участках БАМа, где не планируется электрификация сети, для вождения грузовых поездов повышенной длины и массы [11].

Таким образом, на мой взгляд, перспективы **применения ГТД на железнодорожном транспорте в России являются достаточно хорошими.**

**Заключение**

**В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.**

**1. ГТД – это тепловая машина, в которой реализуется термодинамический цикл: газ сжимается и нагревается, а затем энергия сжатого и нагретого газа преобразуется в механическую работу на валу газовой турбины. Очень важно понимать, что в силу закона сохранения энергии в процессе этого цикла вырабатываются разные виды энергии (основные - кинетическая, тепловая) и только часть из них двигатель превращает в полезную работу. Чем больше эта часть энергии, тем двигатель эффективнее.**

**2. Для характеристики эффективности ГТД введено понятие коэффициента полезного действия двигателя — КПД. КПД теплового двигателя называется отношение совершённой полезной работы двигателя к энергии, полученной от нагревателя. В отличие от поршневого двигателя КПД реальных ГТД имеет качественную оценку примерно 40-50 %.**

**3. ГТД широко применяются в технике: - авиационной – примерно 70% (самолеты, вертолеты, крылатые ракеты, беспилотные летательные аппараты); - наземной - 20% (в энергетике, промышленности и на транспорте); - морской -10%.**

**4. В 1791 английский изобретатель Дж. Барбер *впервые предложил идею* создания ГТД с газогенератором, поршневым компрессором, камерой сгорания и газовой турбиной – это начало истории ГТД.**

**Однако, не умаляя роли других стран, прежде всего, таких как Германия и Англия, следует отметить достойный вклад русских учёных и инженеров в создание и развитие газотурбинной техники.**

Русский инженер П. Д. Кузьминский в 1892 разработал проект, а в 1900 *построил ГТД* со сгоранием топлива при постоянном давлении. Начался век развития газотурбодвигателестроения в России.

Так, большой вклад в создание авиационных ГТД внёс советский конструктор А. М. Люлька (академик АН СССР). **Выдвинутая им еще в предвоенные годы техническая идея во второй половине** **XX века была широко реализована во всем мировом авиадвигателестроении. Турбореактивные двигатели стали доминирующими как в гражданской, так и в военной авиации.**

**5.** Россия, начиная с XX века, является одной из немногих стран мира, способных самостоятельно разрабатывать и серийно производить эффективные авиационные ГТД.

**6. В XXI в. г**азотурбинное двигателестроение в России – это отрасль, от которой в критической степени зависит военная, транспортная и энергетическая безопасность страны.

Компания ОДК, входящая в Госкорпорацию «Ростех», специализируется на разработке, серийном изготовлении и сервисном обслуживании двигателей для военной и гражданской авиации, ракетной техники, Военно-Морского Флота, а также для нефтегазовой промышленности и энергетики.

**7.** В 2007 году по инициативе ОАО «РЖД» был изготовлен ГТ1 — самый мощный газотурбовоз в мире, при этом он первый работающий на сжиженном природном газе, мощность ГТД кВт (л.с.) - 8300 (11290).

В связи с развитием железнодорожного машиностроения в России в январе 2021 года главный инженер ОАО «РЖД» Сергей Кобзев определил, что крупным направлением работы являются локомотивы на природном газе. К 2030 году РЖД планируют запустить газомоторные маневровые и магистральные локомотивы на природном газе по Северному широтному ходу и на участках БАМа, где не планируется электрификация сети, для вождения грузовых поездов повышенной длины и массы.

***Таким образом, данная работа содержит следующие результаты исследования:***

***- физические основы ГТД,***

***- краткую историю создания*** ***ГТД и***

***- перспективы применения ГТД в России, в том числе, на примере железнодорожного транспорта.***

***Можно сделать общий вывод: все поставленные задачи решены и цель проекта достигнута.***

**Список литературы и электронных источников**

1. Арбеков А.Н и др. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов/под общ. ред. Вараксина А.Ю.- 4-е изд.- М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.-678с.

2. Дорошко С.М., Глазков А.С. Газотурбинные двигатели гражданской авиации: Уч. пособие/ Университет ГА. – Санкт-Петербург, 2018. -228 с.

3. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. – Пермь: изд-во ОАО "Авиадвигатель", 2006 г.- 1204 с.

4. Казанджан П.К., Тихонов Н.Д., Шулекин В.Т. Теория авиационных двигателей. - М.: Транспорт, 2000.

5. Сайт «Как это работает» Принцип работы газотурбинного двигателя <https://kakrabotaet.ru/kak-eto-rabotaet/gazoturbinnyj-dvigatel-princzip-raboty/>

6. Сайт Википедия, «Газотурбинный двигатель»

<https://ru.wikipedia.org/wiki/Газотурбинный_двигатель>

7. Сайт газеты «Красная звезда»

<http://redstar.ru/gazoturbinnoe-dvigatelestroenie-odna-iz-osnov-tehnologicheskogo-suvereniteta-rossii/>

«Газотурбинное двигателестроение – одна из основ технологического суверенитета России» - Интервью Михаила РЕМИЗОВА, заместителя генерального директора по стратегии и организационному развитию Объединённой двигателестроительной корпорации Ростех РФ, 06.08.2021.

8. Сайт ФГОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

<https://www.rsatu.ru/upload/medialibrary/3a8/Lektsii-Sovremennaya-metodologiya-AD.pdf?ysclid=lm29mcz8vb385413429>

Конспект лекции по дисциплине «Современная методология создания газотурбинных двигателей». - Рыбинск, 2014.- 44 с.

9. Сайт <http://static.government.ru/>

media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf

«Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года». Правительство РФ. Распоряжение от 27 ноября 2021 г. №3363-р.

10. Сайт «Военное обозрение. Авиация». Перспективы ГТД в России.

<https://topwar.ru/196262-kljuchevoj-komponent-odk-vnedrjaet-novye-tehnologii-proizvodstva-lopatok-aviacionnyh-dvigatelej.html>

11. Сайт «Технологии. Инжениринг. Инновации»

<https://integral-russia.ru/2022/03/14/tmh-elektroteh-nachal-proizvodstvo-novyh-ТМХ-Электротех> Новости. Импортозамещение. 14.03.2022.

12. Сайт сборника информации «ВСЕ О ДВИГАТЕЛЕ». - 2020.

<https://avtika.ru/chto-takoe-kpd-gazoturbinnogo-dvigatelya/>

Непосредственное сравнение кпд поршневого и газотурбинного двигателей.

13. Сайт «Техника России» [https://tehnorussia.su/zheleznodorozhnaya-tekhnika/39-gazoturbovozy/5-gazoturbovoz-gt1/Газотурбовоз ГТ1h-002. Газотурбовоз ГТ1h-002](https://tehnorussia.su/zheleznodorozhnaya-tekhnika/39-gazoturbovozy/5-gazoturbovoz-gt1/Газотурбовоз%20ГТ1h-002.%20Газотурбовоз%20ГТ1h-002).

(Первые даты обращения к сайтам: 1-30 апреля 2023г.)