

На правах рукописи



**АРДЕШИРИ ШАДИ**

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СМЕСЕЙ  
БИОТОПЛИВА И КЕРОСИНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Специальность 05.22.14 - Эксплуатация воздушного транспорта**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва 2022**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении Высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА)

<b>Научный руководитель</b>	кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Авиатопливообеспечение и ремонт летательных аппаратов» ФГБОУ ВПО МГТУ ГА <b>Грядунов Константин Игоревич</b>
<b>Официальные оппоненты:</b>	доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» <b>Орешенков Александр Владимирович</b>  кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела двигателей и химмотологии ФГБУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова». <b>Разносчиков Владимир Валентинович</b>
<b>Ведущая организация</b>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева»

Защита состоится «01» июня 2022 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 223.011.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) по адресу:

125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО МГТУ ГА и на сайте ФГБОУ ВО МГТУ ГА [www.mstuca.ru](http://www.mstuca.ru).

Автореферат разослан «    »                      2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 223.011.01  
доктор технических наук, профессор



В. М. Самойленко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Сегодня возрастающий спрос на авиаперевозки предъявляет новые требования к проектированию воздушных судов (ВС) и их силовых установок. Кроме улучшения летно-технических характеристик ВС, надежности в процессе эксплуатации к ВС предъявляют требования по их экономической эффективности и уменьшения воздействия на окружающую среду. Повысить топливную эффективность и снизить воздействие на окружающую среду возможно за счет применения альтернативных видов топлива.

Возрастающие объемы перевозок влекут за собой увеличения потребления авиатоплива гражданской авиацией (ГА). Если в 70-х годах мировые авиаперевозки составляли около 500 млрд пассажиро-километров, то в 2015 году они составили уже больше 6500 млрд пассажиро-километров, что требует ежегодного потребления более 230 млн т. авиатоплива. Основным авиатопливом для гражданской авиации является керосин, производимый из нефти, запасы которой не бесконечны. При таких объемах сжигания авиатоплива ВС ГА объем вредных выбросов составляет более 730 млн тонн в год. Несмотря на то, что от деятельности ГА вредные выбросы составляют порядка 2 % этим обстоятельством озабочена Международная ассоциация воздушного транспорта (ИАТА), которая в 2007 году приняла решение по сокращению вредных выбросов и в дальнейшем их только ужесточает. Альтернативой нефтяным керосинам является применение био синтетического и газового топлив, применение которых позволяет сократить количество вредных выбросов и отвечает требованиям ИАТА по охране окружающей среды. К авиатопливу предъявляются требования, связанные с обеспечением химмотологической надежности работы авиационной техники, следовательно, и альтернативные топлива должны отвечать таким требованиям. Несоответствие свойств альтернативных топлив свойствам керосинов влечет изменение конструкции функциональных систем ВС, а также изменение существующих или создание новых инфраструктур авиатопливообеспечения. Область интересов данной работы распространяется на биотоплива, поэтому далее будет рассматриваться в основном этот вид альтернативного топлива.

Несоответствие физико-химических свойств применяемого биотоплива свойствам нефтяных керосинов может привести к изменению характеристик газотурбинных двигателей (ГТД), таких как тяга и удельный расход топлива. Кроме того, открытым остается вопрос применения биотоплива на ВС – в чистом виде (100 % биотоплива) или в соотношении с керосином (в каких пропорциях)?

Таким образом, видна актуальность поиска альтернативных видов топлива, их применения на ВС, а также оценки эксплуатационно-технических характеристик ГТД при их эксплуатации на биотопливе или смеси биотоплива и керосина.

**Степень разработанности вопроса.** Работы по разработке биотоплива ведутся в разных странах с различной интенсивностью. Так в 2009 году в США организацией ASTM был сертифицирован процесс получения биотоплива по методу Фишера-Тропша, позволяющий получать синтетический парафиновый керосин.

Стоит отметить, что технологию олигомеризации газообразных олефинов с получением жидкого топлива (бензина) предложил в 1913 г. русский химик, генерал царской армии В. Н. Ипатьев. В 1923 г. совместно с сотрудниками фирмы Ruhchemie AG Ф. Фишером и Х. Тропшем была создана технология синтеза жидких углеводородов из смеси CO и H<sub>2</sub>. В 30-е годы XX в. данный процесс был реализован В. Н. Ипатьевым с указанными учёными в США. На данный момент получение топлива по данной технологии (с соответствующими усовершенствованиями) возможно из многих видов сырья, поэтому она является крайне актуальной, в названии же технологии фигурируют только два учёных – Фишер-Тропш.

В Российской Федерации (РФ) вопросом разработки и применения биотоплива уделяется меньше внимания. В основном это связано с недостаточными запасами углеводородного сырья. Однако работы по применению газа в авиации в качестве топлива ведутся специалистами институтов ЦИАМ, химмотологии МО, нефтехимии и катализа, природных газов и газовых технологий и др. Существуют определенные наработки и исследования по производству биотоплива из древесины в том числе из отходов при целлюлозно-бумажном производстве (черный щелок и сырое таловое масло, образующийся при варке целлюлозы), а также отходов

пиломатериалов, которые перерабатывают в биоэтанол, биометанол, и биодизель, и используют как биотопливо. Производства по переработке древесины в биотоплива находились в Ленинградской, Архангельской и Вологодской областях. Подобные производства в последнее время открылись в Пермской области, на Алтае, Ханты-Мансийске, Красноярске, которые производят древесные гранулы или пеллет.

Таким образом, видно, что производство биотоплива не только из древесины, а и из других видов сырья в РФ и оценка по его дальнейшему применению в ГА, влияния на характеристики ГТД является актуальной задачей сегодняшнего дня.

Оценка эффективности применения биотоплива и его смеси с нефтяными керосинами, их влияния на характеристики газотурбинных двигателей (ГТД) требует разработки математических моделей по определению эксплуатационных характеристик двигателя, а также определения соотношения традиционного керосина и выбранного биотоплива в такой смеси. Решение этих задач позволит улучшить эксплуатационные и экологические показатели ГТД и уменьшить зависимость ГА от цен на нефтяные топлива.

**Объект и предмет исследования.** Объект исследования – управление качеством авиатоплива ВС.

**Предметом исследования** – физико-химические свойства нефтяных керосинов и их смеси с биотопливом.

**Цель исследования:** оценка влияния применяемых авиатоплив и их смесей с биотопливом на эксплуатационно-технические характеристики газотурбинного двигателя в том числе и на выбросы на основе разработки математических моделей.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели были поставлены и решены научные задачи:

- сравнительный анализ современных методов получения биотоплив, их применения в авиации и факторов, влияющих на применение биотоплив в авиации;
- теоретические и расчетные исследования сравнительных свойств биотоплив и традиционных керосинов;
- обоснование и разработка математической модели по выбору топливной смеси с разным соотношением биотоплива и керосина;
- разработка математической модели оценки влияния применения смеси биотоплива и керосина на эксплуатационно-технических характеристик ГТД;
- экспериментальная оценка эффективности применения смеси биотоплив и керосина;
- технико-экономическая оценка применяемых смесей биотоплива и керосина.

**Методология и методы диссертационного исследования.**

В работе использованы аналитические и экспериментальные методы исследования по определению физико-химических свойств исследуемых свойств топлив, методы авиационной химмотологии, методы математического моделирования и количественного эксперимента, методы математической обработки полученных экспериментальных данных.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. На основании исследования применения нефтяных керосинов в ГА установлено, что в процессе сжигания они оказывают отрицательное воздействие на атмосферу уменьшить которое можно за счет применения биотоплива третьего поколения.

2. Установлено, что добавление биотоплива в нефтяные керосины приводит к изменению их физико-химических свойств таких смесей, что позволяет, изменяя соотношение биотоплива и керосина, получать требуемые для эксплуатации свойства таких смесей.

3. Разработана математическая модель расчета дроссельной и высотно-скоростной характеристик ГТД в зависимости от состава смеси биотоплива и нефтяных керосинов с учетом их физико-химических свойств, показавшая 97,3 % сходимости при экспериментальном исследовании.

4. Теоретически рассчитаны и экспериментально проверено, что наиболее рациональным соотношением смеси биотоплива и нефтяных керосинов является пропорция 50:50.

**Практическая значимость исследования.**

1. Получены данные влияния состава применяемого авиатоплива на вредные выбросы в окружающую среду.
2. Получены данные влияния соотношения биотоплива и нефтяных керосинов на физико-химические свойства топливных смесей.
3. Предложена математическая модель, позволяющая определить характеристики ГТД в зависимости от свойств применяемого топлива.
4. Проведена технико-экономическая оценка эффективности применения биотоплива или его смеси с нефтяными керосинами на стоимость заправки ВС, количество вредных выбросов и получаемые характеристики ГТД.

#### **На защиту выносятся**

1. Результаты сравнительного анализа влияния добавления биотоплива в нефтяные керосины на физико-химические свойства получаемых топливных смесей.
2. Теоретическое обоснование и математическая модель выбора топливной смеси с разными соотношениями биотоплива и керосина.
3. Математическая модель оценки эксплуатационно-технических характеристик ГТД при их эксплуатации на смеси биотоплива и керосина.
4. Экспериментальная оценка эффективности применения смеси биотоплива и керосина.
5. Результаты технико-экономической оценки применения биотоплива или его смеси с нефтяными керосинами на борту ВС.

**Достоверность** полученных результатов по физико-химическим свойствам традиционных керосинов, биотоплива и их смесей обеспечивалась применением апробированных методик, аттестованного оборудования. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается воспроизводством эксплуатационных свойств нефтяных керосинов ТС-1 и Jet A-1. Адекватность математической модели проверена при помощи расчета эксплуатационных характеристик ГТД при его работе на топливе ТС-1 и Jet A-1.

Теоретические положения работы базируются на применении математического моделирования, обработки экспериментальных данных и исследованиях в области химмотологии.

#### **Апробация работы и публикации.**

Результаты работы докладывались автором на Международной научно-технической конференции, посвященной 95-летию ГА России (май 2018) «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», на научно-технических семинарах на кафедре Авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА.

По теме диссертационной работы опубликованы 6 (43 с) научных статей, 5 (41 с) из которых были опубликованы в изданиях (по транспорту), рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ.

#### **Личный вклад автора**

Диссертантка разработала математическую модель оценки влияния физико-химических свойств применяемого топлива на характеристики ГТД, спланировала и организовала сбор экспериментальной информации по влиянию состава топлива на выбросы из ГТД, разработала методики проводимых экспериментальных исследований и непосредственно участвовала в их проведении в процессе всего цикла исследований, провела сравнительный анализ влияния процентного соотношения биотоплива в керосине на получаемые физико-химические свойства такой смеси.

#### **Структура и объём диссертационной работы**

Диссертационная работа структурно состоит из введения, трех глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений и списка литературных источников. Диссертационная работа изложена на 107 страницах машинописного текста. Диссертация включает 13 таблиц, иллюстрирована 33 рисунками, библиографический список используемых источников состоит из 117 наименований.

#### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** содержится обоснование актуальности научной задачи, формулируются цель работы, ее научная новизна, практическая ценность, а также сведения о реализации и

опубликовании результатов работы. Приводятся объем и структура работы. Формулируются вопросы, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ применения альтернативных видов топлива в авиации и факторов, влияющими на применение в авиации альтернативного топлива, а также методов производства биотоплива.

Сегодня известен ряд альтернативных топлив: авиационное сконденсированное топливо (АСКТ), сжиженный природный газ (СПГ), биотопливо, водород.

Проведем сравнительный анализ потенциальных видов альтернативных авиационных топлив (таблица 1), к которым можно отнести:

- сжиженный природный газ (СПГ). Он имеет энергетическую эффективность на 12 % выше, чем керосин, в 2 раза меньшую плотность и дает значительно меньше вредных выбросов в окружающую среду;

- водород. Имеет энергетическую эффективность, превосходящую керосин почти в 3 раза, а при его сгорании образуется чистый продукт – вода. Однако очень взрывоопасен и имеет малую плотность.

- авиационное сконденсированное топливо (АСКТ) – смесь из нескольких газов, которая находится в попутном нефтяном газе. По энергетической эффективности превосходит керосин приблизительно на 5 % и более экологично.

- биотопливо, получаемое из различных биоресурсов, позволяет сократить вредные выбросы более чем на 50 %.

- ядерное (атомное) топливо, энергия деления ядер атомов которого примерно в  $10^7$  раз превышает энергию химического топлива. Однако требует особой технологии эксплуатации.

Таблица 1. Основные свойства различных видов альтернативного топлива

Основные характеристики	Виды топлива					Керосин
	СПГ	Водород	АСКТ	Биотопливо	Ядерное	
Энергетическая эффективность, МДж/кг	50	125	45	30	76	42,9
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	424	71	642	790	-	800
Температура жидкого состояния, °С	-182,5 до -161,7	-259,2... -252,6	-60 до +5	-114,5 до +78,3	-	+50 до -40
Экологичность	Высокая	Очень высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Базовая

Основными факторами, влияющими на применение в авиации альтернативного топлива, являются такие его характеристики: - энергетическая эффективность; - экологичность авиатоплива при производстве и использовании; - наличие сырьевых ресурсов и объемы производства; - совместимость с конструкционными элементами ВС и АД; - отсутствие особых требований к конструкции и компоновке самолета; - возможность использования существующей наземной инфраструктуры топливообеспечения; - низкая стоимость.

Наиболее перспективным для применения в ГА является биотопливо, которое на 80 % состоит из биоэтанола. Его применение в основном обусловлено высокой экологичностью.

Достоинством является то, что в процессе жизненного цикла биомасса поглощает CO<sub>2</sub> из окружающей среды. В то время как при сжигании биотоплива в окружающую среду возвращается CO<sub>2</sub>. Образуется замкнутый цикл оборота CO<sub>2</sub> и его суммарный баланс в окружающей среде не нарушается. При сжигании нефтяных керосинов происходит дополнительный выброс вредных веществ в окружающую среду. Это позволит при применении биотоплива в ГА уменьшить вредные выбросы в атмосферу в сравнении с применением традиционных керосинов почти на 80 %.

Один из первых полетов на смеси биотоплива и керосина (1:1) был выполнен бразильской авиакомпанией TAM на самолете А-320 с двигателями CFM56. Полет был одобрен Европейским агентством по безопасности авиаперевозок (EASA) и авиационными властями Бразилии (ANAC).

Но для массового применения биотоплива одного полета недостаточно. Необходимо проведение разносторонних исследований, положительные результаты которых позволят

применять биотопливо в ГА. В основном проводятся исследования направленные на изучение влияния применяемого биотоплива на летно-технические свойства ВС.

Существующие биотоплива классифицируются в зависимости от используемых видов сырья и технологий их производства на три поколения (таблица 2).

Таблица 2. Классификация биотоплива по поколениям, сырье и получаемому биотопливу.

Поколения биотоплив	Сырье	Примеры биотоплива
первое	Биологическое сырье: крахмал, растительное масло и животный жир, сахар.	Биоэтанол, биодизель (содержат атом кислорода в молекуле)
второе	Не пищевое сырье (отходы) семена ятрофы, рыжиковые грибы	Биоэтанол, биодизель Биодизель Фишера – Троппа (не содержит атома кислорода в молекуле)
третье	водоросли	Биоэтанол, биоводород, биогаз

Недостатки двигателей на биотопливе:

- ограниченное производство;
- разнородность сырья для его производства, в зависимости от региона и сложность приведения к единому стандарту;
- большая стоимость перевозки и хранения биотоплива.

Однако остается самое главное требование, чтобы применяемое биотопливо можно было смешивать с нефтяным керосином в любой пропорции.

Причинами массового использования биотоплива являются возрастающие экологические требования по сокращению вредных выбросов в окружающую среду, вводимые Европейской системой торговли квотами на выбросы (ETS), а также интересы стран-импортеров нефти.

Для России актуальным является развитие технологий получения синтетических топлив из попутного нефтяного газа (в т. ч. АСКТ), объем добычи которого достигает 50 млрд кубических метров в год. АСКТ может применяться и на самолетах региональной авиации, например на Ил-114 или перспективном проекте регионального самолета Ту-136.

Использование АСКТ не требует существенной доработки авиационных СУ и наземной инфраструктуры. Как показывают расчеты экспертов, перевод региональной авиации на АСКТ позволит снизить себестоимость 1 часа работы воздушного судна на 20–40%.

Однако АСКТ обладает некоторыми недостатками, ограничивающими возможность его широкого применения, особенно в разных вариантах использования. Так как АСКТ практически не содержит полярных гетероатомных примесей, то имеет худшие по сравнению с авиакеросином противоизносные свойства. Высокое давление насыщенных паров при плюсовых температурах не позволяет АСКТ даже в зимних условиях (температуры на земле до +5°C в некоторых районах Сибири и Севера бывают до 10 месяцев в году) размещать в топливных баках с открытым дренажем. Имеет меньшую плотность по сравнению с керосином.

Применение сжиженного природного газа (СПГ) на ВС позволяет повысить энергетическую эффективность на 16–22 % по сравнению с авиационным керосином что позволяет увеличить полезную нагрузку. При этом сокращается на 17 % выброс CO<sub>2</sub>. По прогнозам мировой объем производства СПГ с 2015 по 2025 год вырастет на 60 %, а в России в 5 раз. Одним из преимуществ СПГ является его охлаждающую способность, которая в 5 раз выше, чем у авиакеросина. Использование СПГ в качестве охладителя деталей авиадвигателей может позволить увеличить ресурс таких деталей примерно в 4 раза. Такое преимущество способствует применению СПГ в ГА, особенно в России, обладающей уникальным опытом создания самолетов на СПГ. Следующим этапом должно стать создание самолетов полностью на СПГ.

Одним из важных недостатков СПГ является его низкая плотность. Для сохранения одинаковой энергоемкости такой недостаток влечет необходимость увеличения объемов топливных баков ВС примерно в 1,5 раза. Еще один недостаток СПГ – его низкие критическая температура и диапазон нахождения в жидкой фазе. Поэтому для исключения обледенения арматуры топливной системы и вскипания метана требуется изменение конструкции ВС, а именно применение теплоизоляции, хладостойких топливных баков и коммуникаций топливной системы и уплотнительных материалов. Газообразное состояние СПГ, по сравнению с нефтяным керосином,

требует изменения организации процесса его горения в камере сгорания ГТД. Это вызывает необходимость изменения конструкции системы его подачи в камеру сгорания и распыла, т. е. изменения конструкции топливной системы ГТД. Такие отличия свойств СПГ от нефтяных керосинов влекут необходимость изменения наземной инфраструктуры – транспортировки, хранения, заправки, изменение которой потребует создание специально оборудованных хранилищ, специальных транспортных и заправочных средств, что является дорогой и громоздкой процедурой. При применении СПГ, его производстве, хранении и транспортировке необходимо соблюдать требования по мерам безопасности, так как СПГ является взрывоопасен, токсичен, химически активен и чувствителен к воздействию низких температур.

С точки зрения экологических преимуществ в сравнении с авиакеросином, актуальным является применение водорода, так как в процессе его сжигания не образуется  $\text{CO}_2$ . Сравним достоинства водорода как топлива в сравнении с авиакеросином:

- теплота сгорания водорода на единицу его массы выше, чем у керосина, что приводит к трехкратному уменьшению его удельного расхода по отношению к авиакеросину;
- хладоресурс водорода в 12...15 раз выше, чем у авиакеросина, что обеспечивает высокое охлаждение деталей горячего тракта двигателя, а значит повышает их работоспособность;
- водород обладает низкой излучательной способностью.

Однако водород имеет и свои недостатки в сравнении с авиакеросином. Так, плотность водорода примерно в 11 раз ниже, чем у авиакеросина, что приводит к более низкой объемной теплоте его сгорания. Его применение в авиации также сдерживается высокой энергоемкостью и стоимостью его производства. Кроме того, применение водорода требует решения сложных материаловедческих, инфраструктурных, эксплуатационных, транспортных и других проблем. Работы в этих направлениях ведутся в передовых странах мира.

Один из первых полетов на смеси биотоплива и керосина (1:1) был выполнен бразильской авиакомпанией TAM на самолете A-320 с двигателями CFM56. Полет был одобрен Европейским агентством по безопасности авиоперевозок (EASA) и авиационными властями Бразилии (ANAC). Известно, что голландская авиакомпания KLM выполнила рейсовый полет по маршруту Амстердам – Париж на самолете Boeing 737-800, где в качестве топлива применена смесь керосина и биотоплива, произведенного из непродовольственных животных жиров, в соотношении 1:1, применение которого признано эффективным.

С применением биотоплива, производимого из яatroфы, рыжиковых грибов и животных жиров, авиакомпания Lufthansa на самолете A321 выполнила рейс по маршруту Гамбург – Франкфурт.

Это единичные полеты с применением биотоплива в основном второго поколения (таблица 2). Для массового применения биотоплива таких полетов недостаточно. Сегодня для производства биотоплива начинают применяться новые сырьевые ресурсы (водоросли), что требует проведения разносторонних исследований, положительные результаты которых позволят применять биотопливо в ГА. В основном проводятся исследования, направленные на изучение влияния применяемого биотоплива на летно-технические свойства ВС.

Анализ применяемых альтернативных видов топлива в авиации показывает, что, исходя из современных реалий, наиболее перспективным является применение биотоплива.

Рассмотрены методы производства альтернативных топлив.

На безопасность полета существенное влияние оказывает качество применяемого авиатоплива (рис. 1). Проведенный в работе анализ базы данных Автоматизированной системы обеспечения «Безопасность полетов» (АСО БП) по коду «028 топливная система» (ГОСТ 18675) показывает, что по причинам некондиционности топлива происходит достаточно большое количество инцидентов, аварий и катастроф, что снижает безопасность полетов ВС ГА.

Такой анализ статистических данных подтверждается некоторыми произошедшими инцидентами с ВС ГА. Например, в 2007 г. в аэропортах Анапа, Ростов-на-Дону в топливе обнаружено высокое содержание механических примесей и микробиологические загрязнения. Величина значения показателя фильтруемости авиатоплива превысила установленную норму.

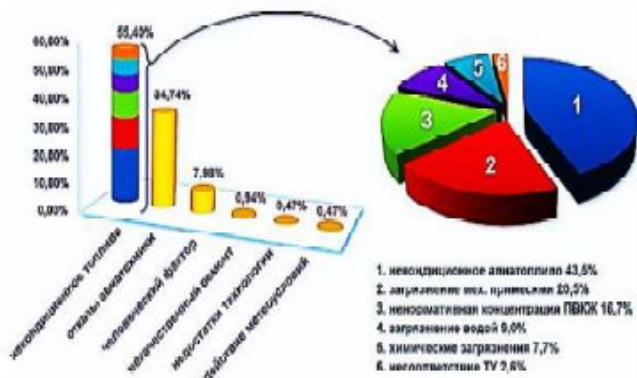


Рис. 1 – Распределение причин инцидентов и авиационных происшествий, отнесенных к коду «028 топливная»

Применяемое в ВС авиатопливо не должно влиять на здоровье человека. От химического состава авиатоплива, используемых в нем присадок, способа получения зависит и состав отработанных газов ГТД. Так, нефтяные керосины в своем составе содержат воду, гетероатомные соединения и углеводороды различных классов, а также при транспортировке и хранении загрязняются механическими примесями. Поэтому экологические показатели применяемого топлива будут определяться его составом и находящимися в нем соединениями. Например, наличие серы в топливе определяет токсичность выбросов за счет образования ее оксидов в отработанных газах ГТД. Основным источником сажи в отработанных газах ВС являются ароматические углеводороды. Поэтому содержание указанных компонентов в авиатопливе строго нормируется руководящими документами и подлежит контролю.

Решение проблемы влияния ВС на окружающую среду видится в первую очередь в добавлении в авиатопливо специальных присадок, а также применение обогащенных смесей в камере сгорания или впрыск в нее воды. Уменьшить воздействие можно за счет сокращения времени работы авиадвигателей на земле или использование меньшего количества двигателей при рулении, а также за счет модернизации двигателей. Более эффективным способом по снижению вредных выбросов в атмосферу от воздействия авиации является применение биотоплив, и в первую очередь, производимых из возобновляемого сырья.

**Во второй главе** проведены теоретические и расчетные исследования сравнительных свойств биотоплив и традиционных керосинов.

С целью выбора авиатоплива или смеси биотоплива и керосина для применения на ВС в эксплуатации проведем сравнительную оценку физико-химических свойств традиционных керосинов и альтернативных топлив и технологий их производства.

Одним из наиболее перспективных является синтетический авиакеросин — это смесь синтетического парафинового керосина (SPK) с традиционным керосином Jet A-1. Полученное по данной технологии топливо имеет низкое содержанием ароматических соединений и серы. Из-за низкого содержания ароматических соединений могут возникнуть технические проблемы, связанные с усадкой уплотнений топливных систем. Минимальное содержание ароматических соединений должно быть не меньше 8 %.

В результате гидрирования жирных кислот и эфиров (HEFA) получают еще один вид биотоплива, где сырьем для являются растительные виды биомассы (морские водоросли, камелина, ятрофа и рыжик). А в результате гидроочистки масел получают еще один вид биотоплива HVO. Термины HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) и HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) применяют в качестве обозначения источников сырья таких топлив — растительные масла и жиры.

Еще одна технология производства биотопливного синтезированного ароматического керосина (HDO-SAK) состоит в гидродезоксигенировании растительного масла или животного жира. В результате получают топливо, которое на 95 % состоит из ароматических

Остро встает вопрос о выбросах продуктов сгорания авиатоплива в атмосферу, а также их объемах и составах. Современная ГА при использовании авиатоплива для ГТД ответственна за 2 % мировой эмиссии CO<sub>2</sub>. В мире массово применяются ВС двух фирм: Boeing – 39,7 % и Airbus – 28,7 %. В РФ парк ВС фирм Boeing и Airbus составляет 61,7 %, отечественные ВС составляют 24 %, а остальной процент (14,3 %) приходится на долю ВС прочих зарубежных производителей (Embraer, Bombardier, De Havilland Canada, Let, ATR). Специалисты TV Discovery Channel утверждают, что за 1 км полета ВС выбрасывает в атмосферу примерно 71,5 кг CO<sub>2</sub>.

соединений. Это позволяет использовать полученный керосин как присадку и добавлять его в другие виды топлив, которые не имеют в своем составе ароматических соединений. Кроме того, керосин, полученный по данной технологии, может быть использован в производстве для получения синтетических или полусинтетических топлив.

Элементы топливных систем авиационных ГТД (фильтроэлементы, насосы, топливорегулирующая аппаратура и т. д.) настроены на применение керосина, имеющего определенные физико-химические свойства. Применение биотоплива, имеющего другие свойства, потребует внесения изменения в конструкцию топливных систем ВС и ГТД. Отличие свойств биотоплива от керосина вызывает необходимость изменения требований по его хранению, транспортировке и т. д., что может повлечь изменение инфраструктуры авиатопливообеспечения ВС. Выход из данного положения видится в совместном применении авиакеросина и лучших видов биотоплива в различных соотношениях для устранения недостатков одного топлива за счет преимуществ другого. Полученная таким образом топливная смесь по своим свойствам будет близка со свойствами керосина, а значит нет необходимости внесения изменений в конструкцию топливных систем ВС и ГТД и инфраструктуры авиатопливообеспечения ВС. На таких смесях проводят исследование получаемых характеристик (тяги, удельного расхода топлива, выбросов и т. д.) ГТД.

Поэтому в работе было проведено сравнительное исследование физико-химических характеристик и эксплуатационных свойств биотоплива FT SPK, смесей биотоплив HEFA SPK и HDO SAK с керосинами в различных пропорциях и нефтяными керосинами TC-1, Jet A-1. Такое сравнение позволит определить наиболее приемлемые пропорции этих топлив для использования в ГА (таблица 3).

Таблица 3. Сравнительные характеристики керосинов, биотоплив и их смесей с керосином.

Характеристики топлива	TC-1	PT	Jet A-1	100 % FT SPK	50 % FT SPK в Jet A-1	50 % HEFA SPK в Jet A-1	17 % HDO SAK в HEFA SPK
плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	786,0	775,0	814,8	759,9	786,6	784,9	775,3
фракционный состав: 10 % отгона, °С 98 % отгона, °С	150,0	135	173,8	158,6	160,7	155,8	148,4
	250,0	155	259,8	220,9	250,0	268,5	276,2
низшая теплота сгорания, МДж/кг	43,2	43,12	43,1	43,8	43,6	43,0	43,6
объемная теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup> × 10 <sup>3</sup>	33,9	33,8	35,1	33,2	34,3	33,8	33,8
объемная доля ароматических углеводородов, %	17,0	20	18,3	0,5	17,5	10,4	15,0
кинематическая вязкость при минус 20 °С, сСт	4,3	4,2	4,7	3,5	3,9	4,5	3,8
массовая доля общей серы, %	0,17	0,1	0,19	0,0	0,14	0,144	< 0,0003
высота некоптящего пламени, мм	26,0	25	22,0	40,0	28,0	32,0	28,6
содержание водорода, %	14,0	14,1	13,7	15,3	15,0	14,5	14,43
содержание углерода, %	86,0	85,8	86,1	84,6	85,0	85,3	85,54
соотношение водород / углерод	0,16	0,16	0,16	0,18	0,18	0,17	0,17

Плотность применяемого авиатоплива является одной из важных показателей топлива. От нее зависит взлетная масса ВС и его энерговооруженность. Уменьшении плотности топлива на 40 единиц ведет к снижению дальности полета примерно на 5 %. Анализ исследуемых топлив и биосмесей (таблица 3) показывает, что они близки по значениям и имеют удовлетворительные значения плотности.

Анализ фракционного состав показывает (таблица 3), что добавление 50 % FT SPK в керосин Jet A-1 улучшает данный его показатель. Хорошие результаты имеет 100 % FT SPK.

Низшая теплота его сгорания определяет теплотворную способность применяемого топлива, от которой зависит топливная эффективность ВС. Высокие значения теплоты сгорания применяемого топлива приводят к повышению топливной эффективности ГТД. По данному показателю анализируемые нефтяные керосины, биотоплива и их смеси имеют примерно одинаковые значения.

Объемная теплота сгорания определяется как произведение массовой теплоты сгорания на плотность топлива. Видно, что множители (плотность) исследуемых керосинов, биотоплив и их смесей имеют небольшие отличия, что приводит и к небольшим отличиям в рассматриваемом показателе (таблица 3).

Химический состав нефтяных керосинов состоит из достаточно большого количества углеводородов. Выделим основные, которые можно разделить на четыре группы: парафины, включая изопарафины; циклопарафины или нафтены; ароматические углеводороды и олефины. Наличие данных углеводородов зависит от исходного сырья и методов получения топлива. Количество тех или иных углеводородов в топливе значительно влияет на его показатели.

Анализ наличия ароматических углеводородов в сравниваемых топливах показывает (таблица 3), что в биотопливе их содержание значительно более низкое по сравнению с традиционным керосином. Смешивание биотоплива и керосина приводит к некоторому увеличению их содержания.

Кинематическая вязкость определяет прокачиваемость топлива, качество его распыла в камере сгорания, смазывающую способность. Поэтому ее ограничивают при высоких и низких температурах минимальным и максимальным значением соответственно. Это также связано с обеспечением холодного запуска двигателя и ВСУ. Все анализируемые топлива и смеси с биотопливом (таблица 3) имеют приемлемые значения вязкости при температуре минус 20 °С. Биотопливо имеет меньшую вязкость в сравнении с керосинами, что является с точки зрения перечисленных характеристик более предпочтительным.

Высота некоптящего пламени (максимальная высота некоптящего пламени (МВНП)), характеризует такой показатель топлива как нагарообразование. Содержание ароматических углеводородов оказывает наибольшее влияние на МВНП. Чем ниже значение высоты некоптящего пламени применяемых топлив, тем выше нагарообразование в процессе сгорания и ниже экологичность ГТД. У чистого биотоплива МВНП значительно превосходит аналогичные показатели керосинов.

Сера и ее соединения в топливе являются нежелательными соединениями. Топлива с высоким содержанием серы обладают большей коррозионной агрессивностью, что приводит к снижению ресурса конструкционных изделий топливных систем ВС и АД. Лучшим по этому показателю является чистое биотопливо, так как не содержит в своем составе серы, а также при его смешивании с Jet A-1 также снижает содержание в нем серы.

Эффективность топлива можно оценить, сравнив их теплотворную способность. В свою очередь теплотворную способность топлива характеризует отношение содержания в нем водорода к углероду Н/С. Углерод имеет значительно меньшую теплоту сгорания массовой единицы, чем водород. Как видно (таблица 3), значения отношения Н/С у биотоплив и смесей с керосином несколько лучше, чем у чистых керосинов. Однако отношение Н/С характеризует и нагарообразующие свойства топлив. Т. е. чем ниже это соотношение, тем выше нагарообразование топлива. Увеличение отношения Н/С приводит к снижению плотности топлива, которая, как видно из таблицы 3, у чистого биотоплива ниже плотности нефтяных керосинов и их смесей с биотопливом.

Проведенное в работе сравнения основных свойств традиционных керосинов, биотоплива, а также их смесей показало, что основные показатели исследуемых топлив имеют значения допустимые по требованиям НТД и могут быть применены на ВС. В процессе эксплуатации под воздействием различных факторов (температура, давление, и т. д.) эти показатели могут меняться. В целом биотоплива, и особенно их смеси с нефтяными керосинами, отвечают предъявляемым требованиям к авиационным топливам и могут быть применены на ВС.

Показатели качества авиационного топлива оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики двигателя такие, например, как приемистость, удельный расход, тяга и т. д. Поэтому при выборе топлива для ГТД требуется руководствоваться не только его экологическими свойствами, а подходить к выбору с точки зрения рационального сочетания всех показателей применяемого топлива.

Проведенный в работе сравнительный анализ свойств авиационных керосинов и биотоплив, полученных различными методами, показал, что наиболее целесообразно на борту ВС применять смеси биотоплив и керосина. Остается выяснить вопрос – какая пропорция керосина и биотоплива должна быть в такой топливной смеси. При приготовлении смеси необходимо учитывать достаточно большое количество показателей, влияющих в конечном случае на свойства смеси, а, следовательно, и на характеристики ГТД. Полученная смесь должна удовлетворять предъявляемым к ней требованиям согласно действующим нормативным документам, чтобы гарантировать получение эксплуатационных характеристик двигателя. Для подбора смеси с показателями, удовлетворяющими требованиям, необходимо проведение большого количества экспериментов. С целью уменьшения количества проведения таких экспериментов в работе предложена расчетная модель, позволяющая рассчитать необходимые пропорции для смешивания биотоплива и керосина с целью получения смеси с удовлетворяющими требованиям показателями.

Проведем оценку влияния процентного содержания биотоплива в наиболее широко применяемых керосинах Jet A-1 и ТС-1 на получаемые свойства смеси. Изменение теплоты сгорания такой смеси в итоге оказывает влияние на тягу и удельный расход топлива ГТД.

Для разработки расчетной модели по оценке свойств смеси биотоплива и керосина в работе использовались расчетные формулы, приведенные ниже. Для проведения расчетов использовали показатели керосинов и синтетического биотоплива СПК, представленных в таблице 3.

На рисунке 2 и 3 представлены зависимости плотность топлива ( $\rho$ ) и массовая теплота сгорания ( $H_u$ ) топливных смесей Jet A-1 с СПК и ТС-1 с СПК от её состава. Видно, что добавление биокеросина в нефтяные керосины понижает их плотность прямо пропорционально увеличению процентного содержания биокеросина, что вполне объяснимо. Из таблицы 3 видно, что биокеросин имеет более высокую массовую теплоту сгорания и его

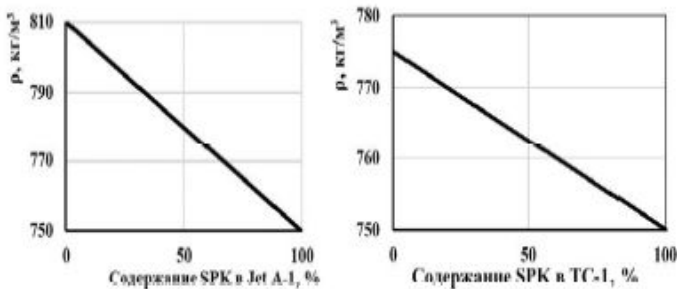


Рис. 2 – Зависимость плотности смеси топлива от её состава

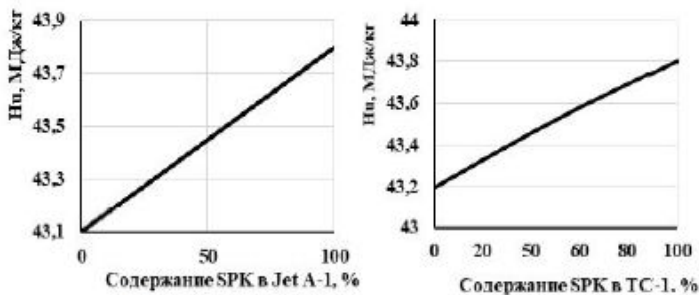


Рис. 3 – Зависимость массовой теплоты сгорания смеси топлива от её состава

добавление в керосин прямо пропорционально ее повышает.

Видно, что плотность меняется прямо пропорционально при добавлении как в Jet A-1, так и в ТС-1. Такое снижение плотности приводит к снижению энерговооруженности ВС и, следовательно, к снижению дальности полета. С изменением температуры меняется и плотность топлива, поэтому применение 100 % биокеросина в качестве основного топлива может привести к сокращению дальности полета на 10 %.

Объемная теплота сгорания определяется как произведение плотности топлива на его массовую теплоту сгорания. Так как величины произведения имеют прямо пропорциональную зависимость от процентного соотношения топливной смеси, то и объемная теплота сгорания также имеет прямолинейную зависимость (рис. 4).

Для осуществления процесса горения в качестве окислителя в ГТД используют кислород,

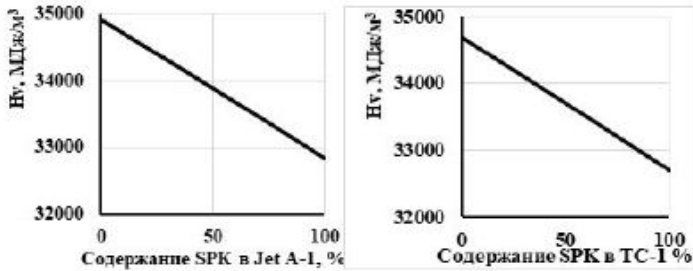


Рис. 4 – Зависимость объемной теплоты сгорания смеси топлива от её состава

содержащийся в воздухе. При известном химическом составе применяемого топлива и необходимой массе окислителя для полного окисления (сгорания) применяемой топливовоздушной смеси потребуется следующая масса воздуха (стехиометрический коэффициент ( $L_0$ )):

$$L_0 = 4,33 \cdot G_o = 4,33 \cdot (2,66g_C + 7,94g_H + g_S) \quad (1),$$

где  $G_o$  – секундный расход массы окислителя, кг/с; 4,33 – коэффициент,

учитывающий массу потребного воздуха, исходя из содержания в нём кислорода, равного 0,232 кгкислорода/кгвоздуха;  $g_C, g_H, g_S$  – массовые доли основных элементов топлива: углерода, водорода и серы.

Стехиометрический коэффициент зависит от соотношения углерод-водород в применяемой топливовоздушной смеси в ГТД. Для дальнейших расчётов влияния состава применяемого топлива на характеристики ГТД упростим данную формулу, а именно пренебрежем массовой долей серы ( $g_S$ ) в топливе. После простых преобразований, формула для расчета стехиометрического коэффициента топливовоздушной смеси будет иметь вид:

$$L_0 = \left(\frac{8}{3}g_C + 8g_H\right)/\psi_{O_2}, \quad (2)$$

где  $L_0$  – стехиометрический коэффициент, кг топлива/кг воздуха;  $g_H$  и  $g_C$  – массовая доля водорода и углерода соответственно в топливе;  $\psi_{O_2}$  – массовая доля окислителя (кислорода) в воздухе, равная 0,232.

В процессе организации процесса горения в камере сгорания ГТД реальный состав топливовоздушной смеси несколько отличается от стехиометрического. Отличие реального состава топливовоздушной смеси от ее стехиометрического состава оценивается коэффициентом избытка воздуха – это избыток окислителя по отношению к его массе в стехиометрической смеси. Его можно рассчитать по формуле:  $\alpha = G_o / (L_o \cdot G_T)$ , где  $G_T$  – секундный расход массы топлива, кг/с, принимаем равным 4000 т/ч.

Секундный расход массы газа через двигатель можно рассчитать по формуле:  $G_r = G_T + G_o$ , где  $G_o$  – секундный расход массы окислителя, кг/с.

Подставляя, получим формулу для расчёта массы газа через ГТД:

$$G_r = G_T \cdot (1 + \alpha \cdot L_o) = G_T \cdot [1 + \alpha \cdot (1 + 2g_H)/0,087], \quad (3)$$

Результаты расчетов потребной массы газа от состава смеси применяемого топлива в процентном соотношении представлены на рисунке 5.

Из анализа результатов видно, что увеличение доли биокеросина в нефтяных керосинах приводит к уменьшению соотношения углерода и водорода в такой смеси. Это в свою очередь влечет к необходимому увеличению расхода газа через ГТД, следовательно, к необходимости увеличивать его размеры, а значит и массу, что нежелательно. Температуру продуктов сгорания можно приближённо рассчитать по формуле:

$$T_r = \frac{H_u}{C_{p_m} \cdot (1 + L_o)}, \quad (4)$$

где  $T_r$  – температура продуктов сгорания, К/кг;  $C_{p_m}$  – средняя изобарная теплоёмкость продуктов сгорания, кДж/(кг·К).

Процесс горения в ГТД на расчётных режимах осуществляется на бедных смесях. На взлетном режиме ВС и при запуске ГТД процесс горения в ГТД осуществляется на богатой смеси. Изменение состава смеси приводит к изменению состава продуктов сгорания, т.е. обеспечению полноты окисления

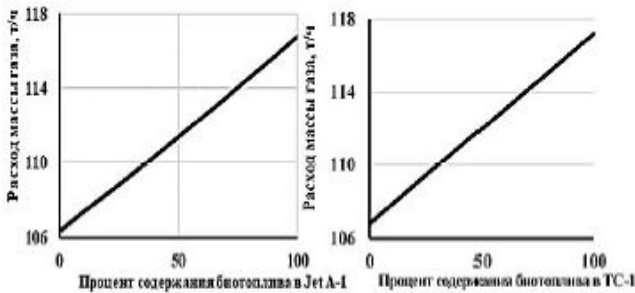


Рис. 5 – Потребная масса газа для окисления смеси топлива в зависимости от её состава

применяемой топливовоздушной смеси. Изменение состава смеси приводит и к изменению температуры продуктов сгорания, которую можно рассчитать по формуле:

$$T_r = \frac{H_u}{c_{pm}(1+\alpha \cdot L_0)} \quad (5)$$

Уменьшение температуры газа продуктов сгорания при использовании обеднённой смеси положительно влияет на ресурс деталей горячей части ГТД, но приводит к некоторому уменьшению получаемой тяги.

Возникает вопрос – какое значение коэффициента  $\alpha$  нужно применять в ГТД при условии изменения состава смеси топливовоздушной смеси с целью получения рационального значения температуры продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания двигателя. В работе проведена оценка коэффициента  $\alpha$ , результаты которой представлены на рисунке 6.

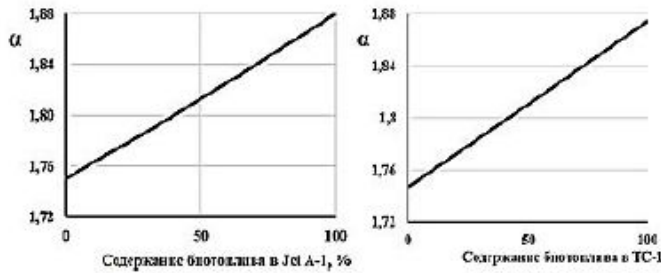


Рис. 6 – Потребное значение коэффициента  $\alpha$  в зависимости от состава смеси топлива для обеспечения оптимальной температуры продуктов сгорания на выходе из камеры

Анализ результатов показывает, что увеличение процентного соотношения биокеросина в топливной смеси приводит к увеличению температуры продуктов сгорания примерно на 5...7%. Это приводит к росту коэффициента избытка воздуха и при значительном увеличении может привести к его росту до нерасчетных режимов.

Важной характеристикой топливовоздушных смесей для организации процесса горения в ГТД является ее вязкость, оказывающая влияние на смазывающие

способности топливовоздушной смеси и на прокачиваемость смеси по топливной системе, а также на распыл смеси форсунками в камере сгорания. При добавлении биокеросина в нефтяные керосины их вязкость будет уменьшаться прямо пропорционально процентного соотношения биокеросина в смеси.

Добавление биокеросина в традиционные керосины приводит к снижению кинематической вязкости, что будет положительно влиять на прокачиваемость такой смеси через топливную аппаратуру и будет способствовать тонкости распыла форсунками в камере сгорания ГТД. В тоже время с увеличением температуры вязкость может уменьшится до критических значений (примерно ниже 1,3 сСт), что может привести к потере смазывающих свойств применяемой топливной смеси.

Проведенные в работе расчеты и анализ полученных результатов показывает, что добавление биокеросина в нефтяные керосины приводит к изменению их физико-химических свойств. Каждый из исследованных показателей оказывает различное влияние на эффективность работы ГТД в целом, о чем указано выше при исследовании каждого в отдельности показателя. Весомость вклада каждого в отдельности из показателей сложно оценить, так как многие показатели взаимосвязаны и оказывают как одинаковое, так и противоположное действие. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что наиболее рациональным соотношением смеси SPK и керосинов Jet A-1 и TS-1 является пропорция 50:50. Кроме того, применение смеси с большим соотношением биокеросина повлечет за собой увеличения стоимости перевозок, что не желательно, а также изменения габаритных размеров ГТД, а значит и его массы.

ИКАО призывает все страны мира к уменьшению выбросов на 50 % к 2050 году. Достижение такой задачи может являться применение биотоплив на воздушных судах.

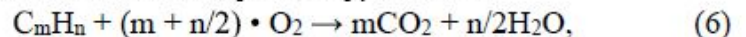
Состав выбросов от процесса сжигания топлива в ГТД определяется составом топлива, его базовой фракцией и степенью очистки, а также применяемыми в топливе присадками. Проведем анализ возможных продуктов сгорания исследуемых топлив. Экологические свойства исследуемых топливных смесей во многом зависят от содержания в них ароматических углеводородов и серы. Эмиссия от ГТД ухудшает качество воздуха и представляет угрозу окружающей среде и здоровью человека. Специалистами ИКАО был создан банк данных (EEDB – ICAO Engine Emission Bank) об эмиссиях различных двигателей, прошедших сертификацию. В нем указаны значения EI (масса вещества, выделяющегося при сгорании единицы массы топлива) для NOx, CO и HC (грамм

выбросов на килограмм сжигаемого топлива), и расход различных видов топлива (кг/с). Дымность сгораемого топлива приведена здесь как безразмерный параметр по десяти бальной шкале. Указанные параметры приведены в банке данных для различных режимов полета.

Из таблицы 3 видно, что 100 % SPK биотопливо не содержит серы. В топливе ТС-1 ее содержание незначительно ниже в отличие от Jet A-1. При сжигании чистого биотоплива оксиды серы не будут образовываться. Добавление биотоплива в топлива Jet A-1 и ТС-1 улучшает эти показатели. Так как в ТС-1 серы несколько меньше, то его смесь с биотопливом по этому показателю будет лучше смеси биотоплива с Jet A-1. Сернистые соединения оказывают токсичное влияние.

Содержание ароматических углеводородов оказывает влияние на образование сажи и выбросов диоксида углерода  $\text{CO}_2$ . Наименьшее количество ароматических углеводородов в биотопливе – 0,5 %, в ТС-1 – 17,0 % и в Jet A-1 – 18,3 %. Следовательно, и количество выбросов сажи будет находится в такой же зависимости. Добавление биокеросина в нефтяные керосины улучшает этот показатель прямо пропорционально. Такой вывод можно подтвердить и таким показателем как высота некопящего пламени у исследуемых топлив.

Выбросы диоксида углерода  $\text{CO}_2$  также напрямую зависят от содержания ароматических углеводородов в топливе. В работе был проведен расчет выбросов  $\text{CO}_2$  для исследуемых смесей керосина с биотопливом. Учитывая, что в работе исследуются новые смеси, то для расчета выбросов  $\text{CO}_2$  от сжигания различных топливных смесей автором был использован так называемый метод индексов выбросов (EI). Данный параметр определяет, какое количество выбросов может произойти при сжигании одного килограмма применяемого топлива. Для расчета введем некоторые ограничения. Будем считать, что в ГТД происходит полное сгорания топлива, а содержанием диоксида серы  $\text{SO}_2$  в продуктах сгорания пренебрежем. Тогда для расчета выбросов исследуемых топлив можно воспользоваться следующим уравнение:



где,  $m$  - количество углерода;  $n$  – количество водорода.

При условии полного сгорания топлива (без загрязняющих веществ) и что топливовоздушная смесь имеет стехиометрический состав,  $\text{CO}_2$  и вода являются единственными продуктами сгорания. Тогда, чем выше теплотворная способность конкретного авиационного топлива, тем ниже количество  $\text{CO}_2$ , образующегося для данного режима полета, и тем ниже вклад топлива в эмиссию двигателя. Чем выше отношение  $\text{H/C}$ , тем выше количество выделяющейся воды  $\text{H}_2\text{O}$ . Полученные автором индексы выбросов  $\text{CO}_2$  коррелируются с данными, полученными другими авторами для керосина Jet A-1. Это согласуется с содержанием ароматических углеводородов в исследуемых топливных смесях (таблица 3), а также их теплотворной способностью и соотношением содержанием водорода к содержанию углерода в топливе.

Таким образом, ставится вопрос рационального подбора состава авиатоплива для уменьшения воздействия его продуктов сгорания на окружающую среду. При создании топливных смесей требуется соблюдение баланса между получаемыми характеристиками – тягой и удельным расходом, а также количеством вредных выбросов и получаемой ценой такой смеси.

**Третья глава** проведен анализ влияния применения смесей биотоплива и керосина на характеристики ГТД при эксплуатации. Проведен расчет дроссельной и высотной характеристик ГТД с помощью разработанной в работе математической модели при использовании различных топливных смесей. Адекватность модели подтверждена результатами эксперимента. Проведена оценка эффективности применения различных биотопливных смесей и керосина.

Основная задача математического моделирования ГТД – это расчет его эксплуатационных характеристик, то есть определение тяги и удельного расхода топлива в заданных условиях полета ( $N$  и  $M_n$ ) на заданном установившемся режиме его работы, то есть параметры потока газа в любой точке проточной части двигателя принимаются неизменными во времени. При этом предполагается, что до начала моделирования известны расчетные параметры двигателя. В данной работе принимаем, что расчетные параметры двигателя нам известны. Проведем оценку влияния свойств (теплота сгорания, содержание водорода и т. д.) применяемых топлив на тягу и удельный расход топлива.

Рассмотрим математическую модель, которая учитывала бы основные свойства применяемого топлива с учетом сложных химических процессов в химмотологической системе смеси биотоплива и керосина. Немаловажным вопросом в этом случае является снижение вредных выбросов от применяемых авиатоплив.

Разработка математической модели по оценке влияния свойств применяемого топлива на высотнo-скоростную и дроссельную характеристики ГТД позволит расширить область возможного применения биотоплива и его смесей с керосином в ГА.

При расчете эксплуатационных характеристик ГТД задаются условия полета ( $H$  и  $M_H$ ) и режим его работы путем задания управляющих факторов. Считается, что в рассматриваемой ниже схеме ТРД имеется лишь один управляющий фактор – подача топлива в основную камеру сгорания ( $G_T$ ). Следовательно, с помощью этого управляющего фактора может производиться управление лишь одним управляемым параметром, например: приведенной частотой вращения ротора  $n_{пр}$ ; физической частотой вращения ротора  $n$ ; температурой газов перед турбиной  $T_T^*$ ; тягой двигателя  $P$ .

В качестве управляемого параметра выбрана физическая частота вращения ротора  $n$ . В процессе моделирования будут меняться только параметры рабочего тела – авиатоплива. Зная параметры топливных смесей, проедем с помощью математической модели оценку их влияния на характеристики ГТД. В качестве рабочего тела были выбраны следующие топливные смеси, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Исходные данные для математической модели видов топлив

№ п/п	Марка топлива	$H_u$ , кДж/кг	$\eta_r$	$k_r$	$g_T$	$c_{п}$ , кДж/(кг·К)
1	Jet A-1	43100	0,98	1,11	0,02	2,01
2	50 % FT SPK в Jet A-1	43600	0,995	1,14	0,0196	1,98
3	TC-1	43200	0,98	1,33	0,031	1,276
4	17 % HDO SAK в HEFA SPK	43600	0,99	1,13	0,0198	2,0
5	50 % FT SPK в TC-1	43500	0,993	1,21	0,0194	1,78

При проведении математических расчетов необходимо учитывать свойствам рабочего тела, которым является топливовоздушная смесь. Такими показателями являются показатель адиабаты  $k$  и газовая постоянная  $R$ . В приближенных расчетах их можно считать постоянными, приняв для воздуха значение  $k=1,4$ , а для газа, т. е. смеси воздуха и продуктов сгорания топлива, –  $k_r=1,25\dots 1,33$ . Газовая постоянная для воздуха принимается равной  $R=287,05$  Дж/(кг·К), а для газа –  $R_r=287,6$  Дж/(кг·К).

В работе проведем более точный расчет этих параметров с использованием аппроксимационных зависимостей. Показатель адиабаты для воздуха будем рассчитывать по следующей формуле:

$$k = \frac{(1+1,5 \cdot 10^{-3} T^*)}{(0,672+1,2 \cdot 10^{-3} T^*)}, \quad (7)$$

где  $T^*$  – абсолютная температура в соответствующем расчетном сечении.

Для вычисления  $k_r$  существует аналогичное выражение:

$$k_r = \frac{(1+1,5 \cdot 10^{-3} T^*)}{(0,672+1,2 \cdot 10^{-3} T^*)} - 0,7g_T + 1,1g_T^2, \quad (8)$$

где относительная величина расхода топлива  $g_T$  в основной камере сгорания равна:

$$g_T = \frac{c_{п}(T_T^* - T_K^*)}{\eta_r H_u}, \quad (9)$$

$H_u$  – теплотворная способность топлива.

Условная теплоёмкость процесса подвода тепла в камере сгорания  $c_{п}$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  определяется по следующей формуле:

$$C_{п} = 0,883 + 2,09 \cdot 10^{-4} (T_T^* + 0,48 \cdot T_K^*), \quad (10)$$

Газовую постоянную можно вычислить по следующей приближенной формуле:

$$R_r = 287,05 + 24,5g_T, \quad (11)$$

Коэффициент, учитывающий физические свойства воздуха или газа в любом сечении двигателя и входящий в формулу расхода, определяется выражением:

$$m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (12)$$

Все представленные в работе формулы, за исключением (9) и (12) являются полуэмпирическими, достоверность которых проверялась для широкого класса задач.

Основываясь на изложенном для проведения расчетов влияния применяемого топлива на тягу и удельный расход топлива ГТД, необходимо выбрать варьируемые параметры топливных смесей. В качестве таких параметров можно выбрать следующие характеристики:

- $H_u$  – теплотворная способность топлива, кДж/кг;
- $\eta_r$  – коэффициент выделения тепла (полнота сгорания);
- $c_p$  – условная теплоемкость процесса подвода теплоты при горении керосина в воздухе, кДж/(кг·К);
- $k_r$  - показатель адиабаты;
- $g_r$  – относительный расход топлива в камере сгорания.

Выбранные варьируемые параметры для каждой марки топлива или топливной смеси представлены в таблице 3. Проведём их анализ. Видно, что основные физико-химические свойства взятых для математического расчета топлив отличаются на 5...8 %, что является не критическим отличием. Однако, как будет отмечено ниже, эти отличия оказывают влияние на высотно-скоростную и дроссельную характеристики ГТД.

Программа регулирования двигателя на максимальном режиме формируется по линии предельных режимов. Для расчета воспользуемся данными с бортовых систем ГТД, которые фиксируют:  $T_k^*$  – температура воздуха на входе в компрессор;  $n$  – частоту вращения ротора;  $T_t^*$  – температура газа за турбиной, по которой косвенно измеряют температуру газа перед турбиной  $T_r^*$ . Как было отмечено ранее, программу регулирования ГТД не будем менять, а только вводим данные свойств выбранных для исследования авиатоплив (таблица 3).

Результаты полученных расчетов зависимостей тяги и удельного расхода топлива от исследуемых марок топлива или смесей биотоплива с керосином представлены на рисунках 7 и 8.

Характер изменения тяги двигателя и удельного расхода топлива уменьшаются с подъемом на высоту при использовании всех видов топливных смесей или топлив. Это можно объяснить уменьшением давления, температуры и плотности атмосферного воздуха с подъемом на высоту и не связано с изменением свойств топлива или топливной смеси. Т. е. характер протекания кривых с увеличением высоты одинаков, а вот сами параметры, удельный расход топлива и тяга двигателя, изменяются в зависимости от изменения теплофизических свойств продуктов сгорания применяемого топлива в воздухе. Это позволяет сказать, что применяемая смесь нефтяного керосина и биотоплива оказывает влияние на рабочий процесс ГТД. Применяемая смесь влияет на получаемые характеристики ГТД в основном через теплоту сгорания топлива, т. е. эффективность работы ГТД зависит от эксергетических возможностей применяемой смеси топлива. Такой вывод подтверждается полученными результатами математического расчета (рис. 7 и 8).

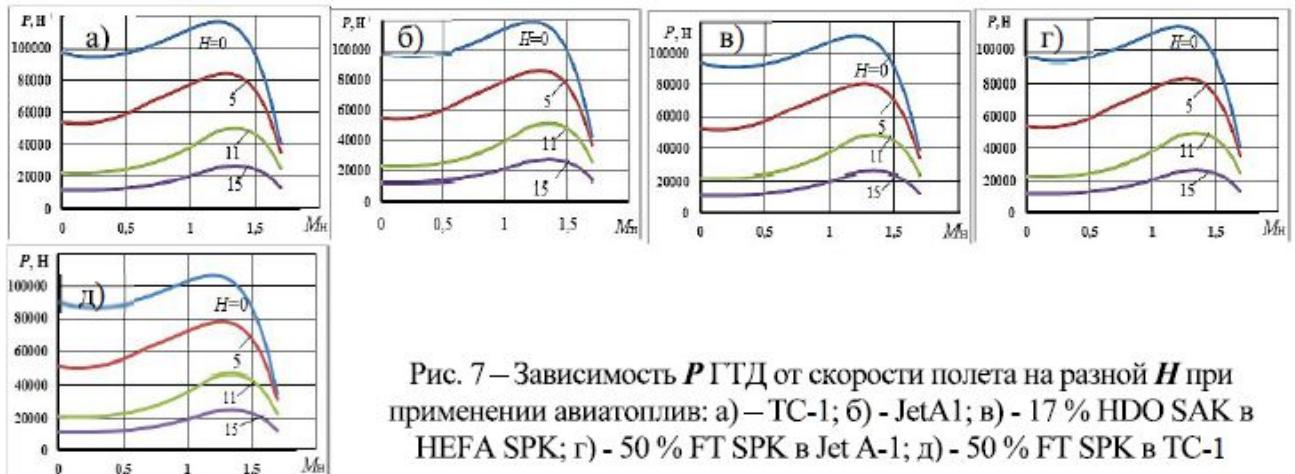


Рис. 7 – Зависимость  $P$  ГТД от скорости полета на разной  $H$  при применении авиатоплив: а) – TC-1; б) - JetA1; в) - 17 % HDO SAK в HEFA SPK; г) - 50 % FT SPK в Jet A-1; д) - 50 % FT SPK в TC-1

При анализе характера изменения удельного расхода топлива (рис. 8) видно, при  $M_H=0$  и при максимальном значении удельной тяги ( $P_{уд}$ ) он имеет минимальное значение. С уменьшением удельной тяги начинает увеличиваться удельный расход топлива.

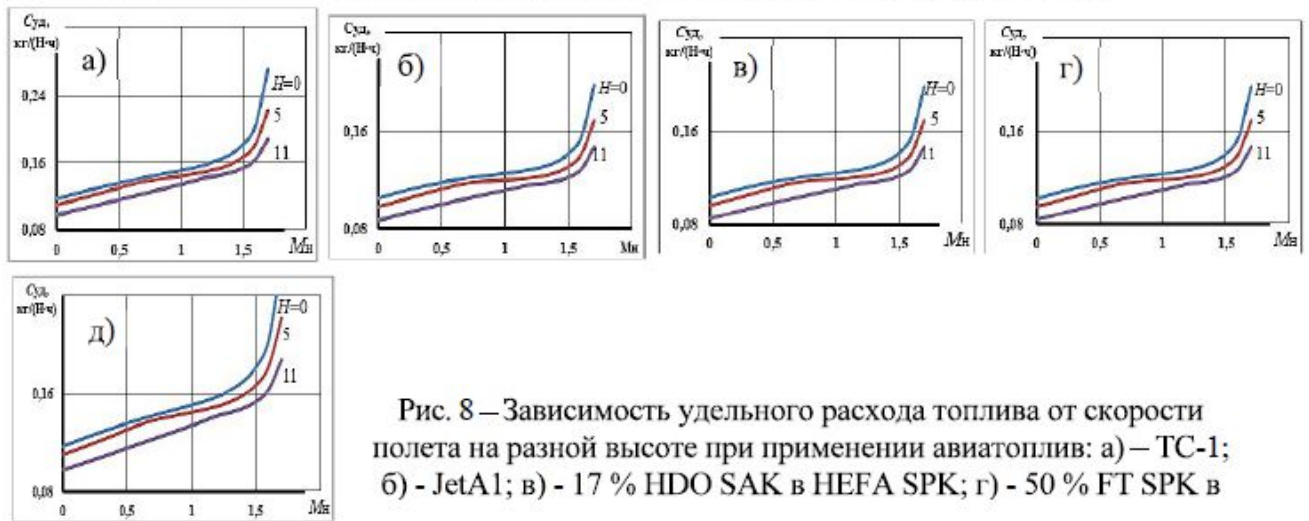


Рис. 8 – Зависимость удельного расхода топлива от скорости полета на разной высоте при применении авиатоплив: а) – ТС-1; б) - JetA1; в) - 17 % HDO SAK в HEFA SPK; г) - 50 % FT SPK в

Наиболее низких значений удельный расход топлива с изменением высоты достигает на высотах примерно 11 км. Это свидетельствует о экономичной работе двигателя на этих высотах, следовательно, и основная эксплуатация двигателя с точки зрения минимального расхода топлива выгодна на этих высотах.

Целесообразно провести анализ результатов математического моделирования с различными видами топлива на этих высотах. Из полученных результатов (рис. 7 и 8) видно, что ГТД будет иметь высшую тягу при его эксплуатации на керосине Jet A-1 и смеси 17 % HDO SAK в HEFA SPK. Незначительно ниже при использовании смеси 50 % FT SPK в Jet A-1. Однако наименьший удельный расход топлива получен при использовании смеси 50 % FT SPK в Jet A-1. Такие данные подтверждаются свойствами исследуемых топлив и смеси биотоплива с керосином. Видно, что добавление биотоплива часть характеристик керосинов улучшает, часть несколько ухудшает. Однако полученные результаты математического моделирования позволяют говорить о возможности применения смеси биотоплива с керосином на ВС.

Предложенная в работе математическая модель позволяет производить расчет дроссельной и высотно-скоростной характеристик ГТД в зависимости от состава смеси биотоплива и нефтяных керосинов с учетом физико-химических свойств топливных смесей. Результаты расчета дроссельной и высотно-скоростной характеристик ГТД, полученные с помощью математической модели, имеют достаточно высокую сходимость с характеристиками ГТД при их эксплуатации на традиционно используемых керосинах нефтяного происхождения Jet A-1 и ТС-1.

Проведенная оценка с помощью математической модели по влиянию состава топлива на получаемые характеристики ГТД показала, что применение смеси биотоплива SPK и керосинов ТС-1 или Jet A-1 позволяет получить более высокую тягу и уменьшить удельный расход топлива. При этом обеспечивается уменьшение вредных выбросов в окружающую среду. Однако математические расчеты не всегда бывают точными.

С целью проверки адекватности разработанной модели и подтверждения получения более высоких характеристик ГТД в работе проведены стендовые испытания двигателя с различным составом топлив.

Сравнительные испытания различных видов топлива были проведены на мини турбореактивном двигателе Jetcat P300 Pro. Топливо Jet A-1 смешивали с биотопливом SPK в различных пропорциях. Для проведения сравнительной оценки топливных смесей проводили замер получаемой тяги и удельного расхода топлива на различных режимах. Для качественной оценки полноты сгорания исследуемых топлив и косвенной оценки выбросов производили сравнительный замер температуры продуктов сгорания после камеры сгорания.

Для сравнительной оценки исследовали чистый нефтяной керосин Jet A-1 и его смесь с биотопливами SPK в пропорции 40 и 50 %, а также смесь керосина Jet A-1 с биотопливом HEFA в соотношении 60:40. После запуска двигателя и его прогрева примерно в течении 1...2 минут для обеспечения его устойчивой работы проводили замер указанных параметров на различных режимах при частоте вращения  $n = 60000, 80000$  и  $100000$  об/мин. Для каждого вида топлива и режима работы замер исследуемых параметров производили не менее 2 раз. Результаты замеров сведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты замера удельного расхода топлива на различных оборотах двигателя исследуемых топлив

Параметр	Jet A-1	Jet A-1+40% SPK	Jet A-1+50% SPK	Jet A-1+40% HEFA
$C_{уд}$ , кг/Нч, при $n=60000$ об/мин	0,153	0,14	0,135	0,133
$C_{уд}$ , кг/Нч, при $n=80000$ об/мин	0,148	0,136	0,13	0,127
$C_{уд}$ , кг/Нч, при $n=100000$ об/мин	0,128	0,098	0,088	0,084

Как видно из результатов исследования с увеличением оборотов двигателя удельный расход для всех исследуемых топлив уменьшается, что свидетельствует о большей полноте их сгорания, а значит двигатель становится более эффективным. Удельный расход топлива у чистого нефтяного керосина Jet A-1 выше, чем у его смеси с биотопливами. Причем с увеличением пропорции биотоплива удельный расход падает, что свидетельствует о большей экономичности двигателя при работе на таком топливе. Этот результат согласуется с проведенными в работе сравнительной оценкой физико-химических свойств топлив и их смесей с биотопливом, а также результатами математического моделирования получаемых характеристик ГТД при использовании различных видов топлива и их смесей. Добавление биотоплива приводит к повышению теплоты сгорания и уменьшению плотности такой смеси, что положительно сказывается на удельном расходе топлива. Видно, что смесь керосина с 50 % биотоплива SPK, по удельному расходу более выгодна, чем смесь керосина с 40 % того же биотоплива.

Добавление биотоплива HEFA в керосин Jet A-1 приводит к уменьшению расхода топлива даже по сравнению с добавлением SPK. Это можно объяснить более высокой теплотой сгорания такого биотоплива. Однако, как отмечено в главе 2, такое биотопливо уступает по другим свойствам биотопливу SPK.

Смешивание керосина с биотопливом положительно влияет на расход топлива, что подтверждает результаты математического моделирования высотной и дроссельно-скоростной характеристик ГТД.

При проведении эксперимента был произведен замер получаемой тяги двигателя при работе на различных видах топлива с изменением его оборотов (таблица 6).

Таблица 6. Зависимость тяги двигателя от применяемого топлива

Параметр	Jet A-1	Jet A-1+40% SPK	Jet A-1+50% SPK	Jet A-1+40% HEFA
$P, H$ , при $n=60000$ об/мин	5,6	5,1	5,0	5,2
$P, H$ , при $n=80000$ об/мин	36	35,2	34,8	34,5
$P, H$ , при $n=100000$ об/мин	60	57,9	57,5	58,6

Результаты таблицы 6 показывают, что применяемые смеси нефтяного керосина и биотоплива оказывают влияние на получаемую тягу ГТД, но в меньшей степени, чем на удельный расход топлива. С увеличением оборотов двигателя тяга двигателя при использовании всех видов топлива увеличивается, что вполне объяснимо. На малых оборотах двигателя его тяга при сжигании всех видов топлива мало отличается. Однако с увеличением оборотов тяга у смесей биотоплива и керосина несколько уменьшается чем у чистого керосина. На такое изменение тяги влияет удельный расход топлива, а так как у смеси биотоплив с керосином он меньше, то и тяга несколько меньше.

Увеличение процентного соотношения биотоплива в керосине приводит к некоторому уменьшению тяги при том же расходе газа через двигатель (при тех же оборотах).

Проведенные экспериментальные исследования параметров двигателя при его работе на различных видах топлива в сравнении с нефтяным керосином Jet A-1 показал, что двигатель

может устойчиво работать на смеси биотоплива и керосина. При этом тяга двигателя может уменьшаться на 3...5 % с увеличением пропорции биотоплива в керосине по отношению к получаемой тягой на чистом керосине, а удельный расход, наоборот, – на 25...30 % улучшится. Это показывает высокую топливную эффективность при применении смеси биотоплива и керосина, что также может играть существенную роль в уменьшении вредных выбросов в окружающую среду от деятельности ГТД. Экспериментальные результаты согласуются с результатами математического моделирования оценки получаемых характеристик ГТД при их работе на различных видах топлива, включая и смесь биотоплива с керосином, что говорит об адекватности предложенной в работе математической модели расчета высотной и дроссельно-скоростной характеристик ГТД.

Проведем сравнительную оценку исследуемых топливных смесей с точки зрения их стоимости для осуществления заправки на один полет и количества выбросов CO<sub>2</sub> в процессе сжигания в ГТД.

Смеси биотоплива с нефтяным керосином имеют меньший удельный расход топлива в сравнении с применением нефтяных керосинов. Это приводит к уменьшению требуемого количества топлива на один и тот же полет, а значит уменьшению взлетной массы ВС. Уменьшение удельного расхода топлива положительно сказывается и на уменьшении вредных выбросов от сжигания такого топлива. Эти два обстоятельства косвенно влияют и на количество вредных выбросов.

Проведем расчет выбросов CO<sub>2</sub> исследуемых топливных смесей. Выбросы от топлив, произведенных из биомасс, принимаются как нуль, так как растения способны поглощать из атмосферы выбросы CO<sub>2</sub>, образовавшихся во время горения, что может быть компенсировано воздействием на окружающую среду. То есть жизненный цикл выбросов CO<sub>2</sub> от биомасс будет менее продолжительным, чем жизненный цикл CO<sub>2</sub> от нефтяных керосинов. Выбросы оцениваются индексом выбросов и рассчитываются за цикл полета по формуле:

$$CO_2 = \frac{EICO_2}{H_u}$$

Результаты расчетов сведены в таблице 7. Видно, что добавление 50 % биотоплива к нефтяным керосинам уменьшает количество выбросов на 2...2,5 % по сравнению с применением чистого керосина за рейс. При использовании чистого биотоплива сокращение выбросов может достигать до 4 % по сравнению с нефтяными керосинами. Это также подтверждается несколько высшим отношением водорода к углероду в топливных смесях с биотопливом (таблица 3).

Таблица 7. Результаты расчетов индекса выбросов от применяемого топлива

Марка топлива	Индексы выбросов CO <sub>2</sub>	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Выброс CO <sub>2</sub>
Jet A-1	3,167	43,1	0,0735
TC-1	3,161	43,2	0,0732
100% SPK	3,10	43,8	0,0707
50% SPK + 50% Jet A-1	3,13	43,6	0,0717
50% SPK + 50% TC-1	3,127	43,6	0,0717

Немаловажным фактором при использовании любого топлива на ВС является его стоимость. Стоимость топлив из возобновляемых источников сырья сегодня превышают стоимость керосина примерно вдвое. Для примерных расчетов стоимости полной заправки ВС типа А-330 и А-320 от стоимости топливовоздушной смеси нефтяного керосина и биокеросина SPK примем его стоимость порядка 100 тыс. руб. за тонну. Стоимость нефтяных керосинов в зависимости от сезона колеблется от 43 тыс. до 53 тыс. руб. за тонну. Для расчетов возьмём среднее значение, тогда можно рассчитать стоимость полной заправки ВС в зависимости от процентного состава смеси керосина и биотоплива (рис. 9).

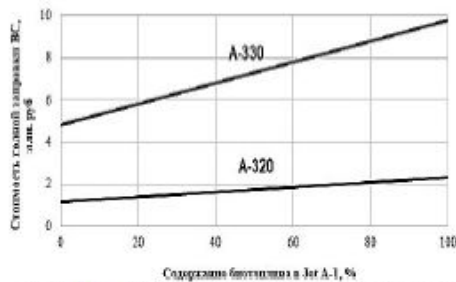


Рис. 9 – Зависимость стоимости полной заправки ВС от состава смеси топлива

Видно, что с увеличением содержания биокеросина SPK в авиакеросине увеличивается стоимость заправки ВС. Так как А-330 имеет большую массу заправляемого топлива, то и цена полной его заправки с увеличением содержания биокеросина SPK в керосине увеличивается более значительно.

Как видно из исследования, существует компромисс при выборе топлива для его применения на ВС. Однако при разработке альтернативных видов топлива и их комбинаций с нефтяными керосинами необходимо находить баланс между удельным расходом топлива, ценой на производство топлива и количеством вредных выбросов от его применения.

Оценка эффективности исследуемых топлив показала, что при применении биотоплива или его смеси с нефтяными керосинами стоимость заправки ВС возрастает, но сокращается количество вредных выбросов и удельный расход топлива.

Для проведения полноценного сравнения эффективности исследуемых смесей биотоплива с нефтяными керосинами необходимо провести сравнение жизненных циклов нефтяного керосина и биотоплива.

Жизненный цикл традиционного авиационного топлива (керосин) можно описать следующими этапами: получение сырья (нефти); ее транспортировка до нефтеперерабатывающего завода; производство керосина (разделение фракций или прямая перегонка нефти); транспортировка керосина в топливозаправочные компании (аэропорты); применение топлива на борту ВС (сжигание). Качество получаемого керосина во многом зависит от исходного сырья (нефти), а процесс его сжигания (полнота) от его состава. Это приводит к образованию выбросов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{NO}_x$  в процессе сжигания керосина. Для оценки полного цикла требуется оценить способность растений поглощать выбросы, что является достаточно сложной задачей.

Несмотря на то, что конкурентоспособность биотоплива с нефтяными керосинами еще не достигнута, с глобальной точки зрения очевидно преимущество жизненного цикла биотоплива из водорослей.

### Заключение

В диссертационной работе решена научная задача по оценке влияния применения биотоплива и его смеси с нефтяными керосинами на характеристики газотурбинных двигателей. Задача имеет значение для эксплуатации воздушного транспорта. Основные выводы по проведенным исследованиям сформулированы в конце каждой главы диссертации. По результатам проделанной работы можно сделать следующее заключение:

1. Проведен анализ развития и применения альтернативных видов авиатоплива в авиации, а также проводимых работ в этом направлении, показавший, что наиболее перспективной технологией производства биотоплива является технология производства из возобновляемых источников сырья, а именно – водорослей, которая будет более рентабельной и экологически чистой (с минимальным выбросом  $\text{CO}_2$  в атмосферу).

2. Проведенный в работе расчет показателей биотоплива и его смеси с керосинами показал, что добавление биотоплива в традиционные керосины уменьшает плотность такой смеси, что приводит к уменьшению дальности полёта ВС. Плотность зависит от температуры, поэтому применение 100 % биотоплива может привести к сокращению дальности полёта примерно на 10 %.

3. Проведенный в работе расчет показателей биотоплива и его смеси с керосинами показал, что значительное увеличение содержания биотоплива в смеси с традиционными керосинами уменьшает соотношение С/Н в такой смеси, что для организации процесса горения требует увеличения потребного расхода газа через двигатель, а значит, к увеличению его размеров и массы, что не желательно, а при увеличении содержания биотоплива в традиционном керосине (свыше 7 %) приводит к увеличению температуры продуктов сгорания смеси, а, следовательно, к увеличению потребного коэффициента избытка воздуха, а также к снижению кинематической вязкости, что положительно влияет на тонкость ее распыла в камере сгорания ГТД и прокачиваемость топливной смеси через топливную аппаратуру. Но при снижении вязкости смеси ниже критического значения (примерно менее 1,3 сСт) снижаются смазывающие свойства смеси, а большинство биотоплив имеют низкие смазывающие способности.

4. На основании проведенных в работе расчетов показателей качества биотоплива и его смесей с керосинами и сравнительного анализа этих показателей установлено, что наиболее целесообразно применять в качестве авиатоплива на ВС смесь SPK и Jet A-1 в соотношении 1:1, что позволяет обеспечить приемлемые эксплуатационно-технические характеристики ГТД и не требует изменения инфраструктуры существующей системы авиатопливообеспечения и внесения

изменений в конструкцию функциональных систем ВС и АД.

5. Разработана математическая модель расчета взлетно-скоростной и дроссельной характеристики ГТД в зависимости от физико-химических свойств применяемого на ВС авиатоплива.

6. Проведен расчет дроссельной и высотно-скоростной характеристик ГТД, получаемых при применении смеси биотоплива с традиционными керосинами в различных пропорциях. Установлено, что при использовании смеси биотоплива и керосина тяга двигателя может уменьшаться на 3...5 % с увеличением пропорции биотоплива в керосине по отношению к получаемой тягой на чистом керосине, а удельный расход, наоборот – на 25...30 % снижается по отношению к керосину Jet A-1. Применение смеси биотоплива и керосина Jet A-1 позволяет получить более высокие характеристики ГТД.

7. Проведенная оценка эффективности исследуемых топлив показала, что при применении биотоплива или его смеси с керосинами стоимость заправки ВС возрастает, но сокращается количество вредных выбросов и удельный расход топлива.

Полученные результаты дают возможность дальнейшего совершенствования использования топливных смесей нефтяных керосинов и биотоплива для снижения вредных выбросов в окружающую среду и получения рациональных дроссельной и высотной характеристик ГТД в зависимости от условий эксплуатации.

**Список публикаций автора** по теме диссертации включает 6 научных трудов, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ (41 с.); 1 публикация в трудах международных и всероссийских конференций (1 с).

**Научные публикации в рецензируемых научных изданиях, (по транспорту)** рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Ардешири, Ш. Влияние метода отбора проб масла на диагностирование узла трения / Ш. Ардешири, Е. А. Коняев, К. И. Грядун, П. Джафари // Научный вестник МГТУ ГА. – М.: МГТУ ГА, 2014. № 206. – С. 28...36.

2. Ардешири, Ш. Диагностические признаки загрязнения проточной части авиационных газотурбинных двигателей / Ш. Ардешири, Е. А. Коняев, В. Ф. Банбан, П. Джафари // Научный вестник МГТУ ГА. – М.: МГТУ ГА, 2014. № 206. – С. 137...138.

3. Ардешири, Ш. Сравнительный анализ показателей качества авиационных керосинов, биотоплив и их смесей / Ш. Ардешири, К. И. Грядун, А. Н. Козлов, В. М. Самойленко // Научный вестник МГТУ ГА. – М.: МГТУ ГА, 2019. Том 22, № 5. – С. 67...75.

4. Ardeshiri, Sh. The impact of physico-chemical properties of the jet fuel and biofuels on the characteristics of gas-turbine engines / Sh. Ardeshiri // Научный вестник МГТУ ГА. – М.: МГТУ ГА, 2019. Том 22, № 06. – С. 9...16.

5. Ардешири, Ш. Обоснование соотношения биотоплива и керосина в смеси для её применения в качестве авиатоплива / Ш. Ардешири, В. М. Самойленко, К. И. Грядун, А. Н. Тимошенко // Научный вестник МГТУ ГА. – М.: МГТУ ГА, 2020. Том 23, № 3. – С. 17...28.

**Список докладов по теме диссертации:**

1. Ардешири, Ш. Оценка возможности использования биотоплива в воздушных судах гражданской авиации / Ш. Ардешири / Международная научно-техническая конференция, посвященная 95-летию ГА России / – Москва: В сборнике трудов конференции «ГА на современном этапе развития науки, техники и общества», 2018, С. 79...80.

Соискатель



Ардешири Шади