

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

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»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Грядунов К. И.

Москва 2021

Содержание

	Стр.
Введение	4
1 Эксплуатационные факторы, влияющие на применение биотоплив в авиации	11
1.1 Анализ применения альтернативных топлив в авиации	11
1.2 Методы получения альтернативных видов топлив	24
1.3 Влияние применяемых авиатоплив на безопасность полетов и окружающую среду	32
Выводы по главе 1	37
2 Теоретические и расчетные исследования сравнительных свойств биотоплив и традиционных керосинов	38
2.1 Сравнительный анализ свойств применяемых и перспективных авиационных топлив	38
2.2 Теоретическое обоснование и расчетная модель выбора топливной смеси с разными соотношениями биотоплива и керосина	49
2.3 Оценка влияния применяемых топливных смесей на выбросы двигателя	61
Выводы по главе 2	66
3 Разработка модели оценки применения смесей биотоплива и керосина при эксплуатации авиационных двигателей	68
3.1 Математическая модель оценки эксплуатационно-технических характеристик ГТД при их эксплуатации на смеси биотоплива и керосина	68
3.2 Экспериментальная оценка эффективности применения смеси биотоплива и керосина	80
3.3 Технико-экономическая оценка применяемых смесей биотоплива и керосина	87

Выводы по главе 3	92
Заключение	94
Список сокращений и условных обозначений	97
Список литературных источников	98

Введение

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 [16, 80, 82, 97]. Повысить топливную эффективность и снизить воздействие на окружающую среду возможно за счет применения альтернативных видов топлива [53, 54].

Применение на ВС авиакеросина по энергоемкости и экологичности при возрастающей на него цене не вполне удовлетворяет сегодняшним тенденциям развития ВС.

Возрастающие объемы перевозок [84, 92] влекут за собой увеличения потребления авиатоплива гражданской авиацией (ГА). Так по данным исследований [51, 63, 84, 92, 104] 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. Таким образом можно спрогнозировать рост объемов авиаперевозок, который можно оценить в 3,5...4,5 % ежегодно. Соответственно возрастает и количество вредных выбросов. 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 [53, 54].

Альтернативой нефтяным керосинам является применение био синтетического и газовых топлив, применение которых позволяет сократить количество вредных выбросов и отвечает требованиям ИАТА по охране окружающей среды [4, 7, 49, 105]. К авиатопливу предъявляются требования, связанные с обеспечением химмотологической надежности работы авиационной техники [18, 36], следовательно, и альтернативные топлива должны отвечать таким требованиям. Несоответствие свойств альтернативные топлива свойствам керосинов влечет изменение конструкции функциональных систем ВС, а также изменение или создание новых инфраструктур авиатопливо обеспечения. Область интересов данной работы распространяется на биотоплива, поэтому далее будем рассматривать 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 [55, 74, 90]. Так в 2009 году в США организацией ASTM был сертифицирован процесс получения биотоплива по методу Фишера-Тропша, позволяющий получать синтетический парафиновый керосин. Метод позволяет получать парафиновый керосин из бытовых отходов, материалов разного происхождения, в том числе биологических масс.

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 H₂. В 30-е годы XX в. данный процесс был реализован В. Н. Ипатьевым с указанными учёными в США [Технологии GTL – перспективы развития. Газ вместо нефти – это возможно // Роснефть. На переднем крае науки и техники. 2013. 27 ноя. С. 1.]. 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.

Предъявляемые требования к топливу требуют особого подхода к применения альтернативных топлив на ВС [85]. В западных странах и особенно в США в последнее время интенсивно разрабатывают биотоплива для авиации и проводят его испытания. В основном работы направлены на совместное применение биотоплива и нефтяного керосина [71, 85, 108].

В Российской Федерации (РФ) вопросом разработки и применения биотоплива уделяется меньше внимания. В основном это связано с применением газа в авиационной технике. 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. [13]. 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 применяют как биотопливо [39]. 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

применение в ГА, влиянию 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:

- проведен 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.

1 Эксплуатационные факторы, влияющие на применение биотоплив в авиации

1.1 Анализ применения альтернативных топлив в авиации

К авиационным топливам, применяемым в ГА, предъявляют требования, связанные с экономичностью и надежностью работы авиационной техники [5, 18], что связано с требованиями повышения топливной эффективности ВС. Для повышения топливной эффективности ВС используют различные способы: применяют легкие материалы, включая современные композиты; улучшают аэродинамику крыла и ВС в целом; применяют новые технологические решения в процессе производства ВС и двигателя; разрабатывают новые экологические и более экономические авиационные двигатели. Топливная эффективность новых двигателей требует использования новых видов авиатоплива с заданными свойствами.

Разработка авиатоплива, которое можно применять в коммерческих компаниях мира вместо авиакеросина, является сложным вопросом. С учетом условий эксплуатации и особенностей организации и протекания процесса горения в камере сгорания разрабатываемое авиатопливо должно соответствовать следующим основным требованиям:

- обладать высокими энергетическими свойствами, которые определяются в первую очередь удельной теплотой сгорания топлива и его плотностью;
- иметь высокую стабильность к окислению при хранении, транспортировке и применении на ВС;
- иметь высокую смазывающую способность, позволяющую повысить ресурс пар трения;

- не вызывать коррозии агрегатов топливных систем ВС и ГТД, выполнять защитную функцию;
- иметь необходимую прокачиваемость в широком интервале температур;
- обладать антиэлектростатическими свойствами;
- обеспечивать высокую полноту сгорания;
- быть нетоксичным.

Известно [33], что ИКАО делает прогноз о непрерывном снижении авиацией потребления нефтяных керосинов, а значит постепенно будут уменьшаться вредные выбросы от деятельности авиации в окружающую среду. Сегодня известен ряд альтернативных топлив: авиационное сконденсированное топливо (АСКТ), сжиженный природный газ (СПГ), биотопливо, водород [4, 33].

Замену нефтяным керосинам начали искать еще в 50-70-х гг. XX столетия. Такие попытки применения ВС с альтернативным топливом были осуществлены в СССР и США, когда были созданы и проведены летные испытания экспериментальных ВС (атомолетов), где в качестве источника энергии применялись ядерные реакторы [3]. Это можно считать первыми практическими работами по применению альтернативного топлива в авиационной отрасли. Так в США летающая лаборатория NB-36H с ядерным реактором на борту в 1955-1957 гг. выполнила 47 полетов. Фирма «Дженерал Электрик» изготовила и успешно испытала на земле авиационную силовую ядерную установку NTRE-3. В 1961 году программу закрыли. В СССР в 1961 году выполнено 34 полета на самолете Ту-95ЛАЛ (рисунок 1.1) с ядерным реактором, а в 1972 году самолет Ан-22-ПЛЮ с ядерным реактором выполнил 23 полета. Однако больше практические работы по ядерной авиации в ГА не проводились.

В 1988 году в СССР осуществлен полет первого в мире самолета Ту-155 оснащенного двигателем НК-88, работающим на водороде и СПГ. В течение нескольких лет на Ту-155 было выполнено около 100 полетов, включая международные [26].



Рисунок 1.1 - Самолет Ту-95ЛАЛ с ядерным реактором

Работы по применению газа на других типах авиационной техники были в СССР продолжены. Так на вертолете Ми-8ТГ (рисунок 1.2) были установлены двигатели, которые в качестве топлива могли использовать АСКТ, керосин, а также их смеси [44]. Опытный образец такого вертолета успешно прошел испытания.



Рисунок 1.2 – Газовертолет Ми-8ТГ

Уже в наше время в 2008 году осуществлен первый испытательный полет пассажирского самолета с использованием биотоплива в пропорции 50:50 с керосином (Boeing 747 британской компании Virgin Atlantic (рисунок 1.3)).



Рисунок 1.3 – Самолет Boeing 747

А в 2009 году осуществлен первый испытательный полет нового самолета Antares DLR-H2 на водородных топливных элементах.

С 2011 года нидерландская авиакомпания «Королевская авиационная компания» (KLM) стала первой в мире, которая стала выполнять коммерческие рейсы с использованием биотоплива (рисунок 1.4) [1, 70, 112].



Рисунок 1.4 – Заправка ВС биотопливом

2 октября 2012 года впервые в международной практике в аэропорту в Оттаве поднялся в воздух самолет, который облетел вокруг города, поднялся на высоту 9500 м и благополучно приземлился на 100 % биотопливе.

В 2012-2014 годах осуществлены полеты беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Boeing Phantom Eye на водородном топливе

продолжительностью до 9 часов на высоте свыше 15000 метров (рисунок 1.5). 2 бака БПЛА емкостью 900 кг жидкого водорода, что позволяет ему находиться в воздухе до 4-х дней с полезной нагрузкой 200 кг.



Рисунок 1.5 – БПЛА Boeing Phantom Eye на водородном топливе

Анализ хронологии этих событий показывает заметное повышение в последние годы интенсивности работ по использованию альтернативного авиатоплива и созданию рассчитанной на него авиационной техники.

Проведем сравнительный анализ потенциальных видов альтернативных авиационных топлив (таблица 1.1) [4], 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 10 000 000 раз превышает энергию химического топлива. Однако требует особой технологии эксплуатации.

Таблица 1.1. Основные свойства различных видов альтернативного топлива

Основные характеристики	Виды топлива					Керосин
	СПГ	Водород	АСКТ	Био топливо	Ядерное	
Энергетическая эффективность, МДж/кг	50	125 г	45	30	76	42,9
Плотность, кг/м ³	424	71	642	790	-	800
Температура жидкого состояния, °	-182,5 до -161,7	-259,2 до -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 конструктивными элементами ВС и АД;
- отсутствие особых требований к конструкции и компоновке самолета;
- возможность использования существующей наземной инфраструктуры топливообеспечения;
- низкая стоимость.

Таким образом для ГА разрабатываются и проходят различные стадии исследований достаточно большое количество альтернативных видов топлива.

Проведем анализ альтернативных топлив для применения в ГА.

Известно [6, 74], что наиболее перспективным для применения в ГА является биотопливо, которое на 80% состоит из биоэтанола (рисунок 1.6). Его применение в основном обусловлено высокой экологичностью.

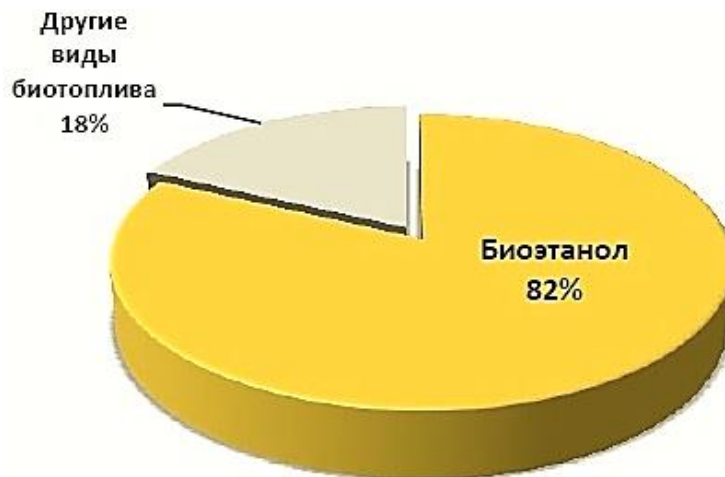


Рисунок 1.6 – Процентное производство мирового биоэтанола по отношению к биотопливу [6, 74]

Основными производителями являются США и Бразилия (рисунок 1.7) [6]



Рисунок 1.7 – Мировые производители биоэтанола [6]

Достоинством является то, что в процессе жизненного цикла биомасса поглощает CO₂ из окружающей среды. В то время как при сжигании биотоплива

в окружающую среду возвращается CO_2 (рисунок 1.8) [99]. Таким образом, образуется замкнутый цикл оборота CO_2 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% [99].

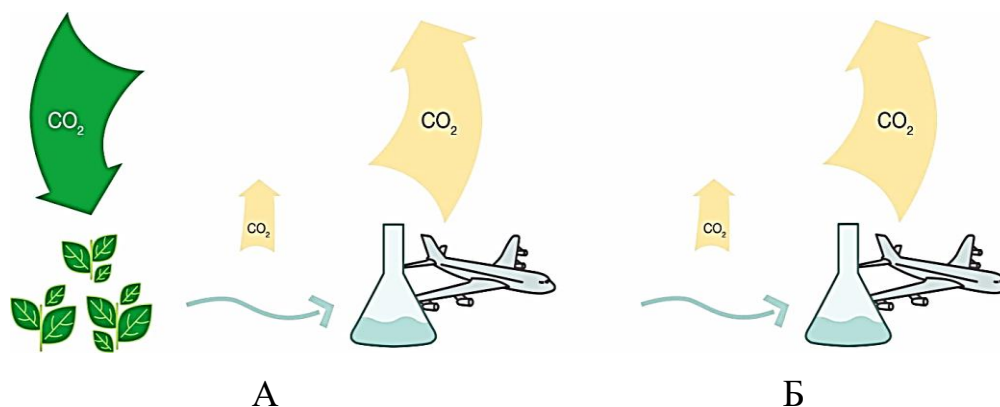


Рисунок 1.8 – Схематическое представление круговорота CO_2 при применении в ГА биотоплива (а) и нефтяных керосинов (б) [99].

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 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 1.2).

Таблица 1.2. Классификация биотоплива по поколениям, сырью 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 – Тропша (не содержит атома кислорода в молекуле)
третье	водоросли	Биоэтанол, биоводород, биогаз

При применении биотоплива необходимо учитывать возможность использования существующих силовых установок и конструкции самолетов, а также наземной инфраструктуры. Мировое производство биотоплива для авиации увеличивается на 8% в год и составит в 2050 году до 57,5 млн тонн или 10% от всего потребляемого авиацией топлива (рисунок 1.9) [39, 60, 78].

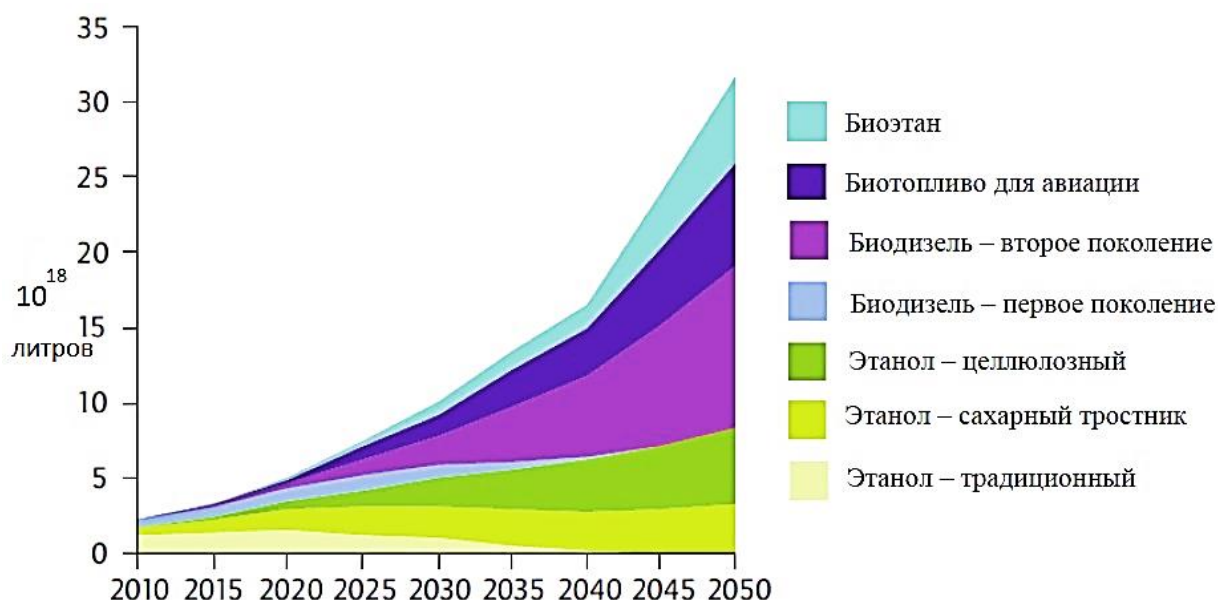


Рисунок 1.9 – Прогноз общемирового спроса на биотопливо до 2050 года [39, 60, 78]

Во многом это связывают с переходом на биотопливо третьего поколения из водорослей, плодородие которых в 150-300 раз выше, чем у наземных сельхозкультур.

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.

Сегодня ГА эксплуатирует около 22...23 тысяч различных типов ВС. Для обеспечения их полета требуется значительное количество авиакеросина, а при переходе на биотоплива, возрастёт и его потребление. Специалисты Airbus делают прогноз, что через 7...10 лет около трети полетов будет выполняться с применением биотоплива [56]. Сегодня стоимость биотоплива выше стоимости нефтяных керосинов, но при увеличении стоимости нефти, а также при совершенствовании технологии производства биотоплив ситуация может измениться. 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. [67].

Успешное применение АСКТ на вертолете МИ-8ТГ показывает перспективы применения этого вида топлива в вертолетном парке России, который растет на 5% в год и составляет на 2015 год более 2500 единиц [44]. АСКТ может применяться и на самолетах региональной авиации, например на Ил-114 или перспективном проекте регионального самолета Ту-136 [8, 62].

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%, сократить вредные выбросы (таблица 1.3), и особенно в районах Крайнего Севера с развитым нефтегазовым промыслом, [30, 62].

Таблица 1.3. Теплофизические и теплотехнические характеристики видов топлива и авиационного керосина ТС-1 [30, 62].

Показатель \ Топливо	ТС-1	СПГ	СЖТГ	АСКТ
Массовая доля водорода	0,141	0,251	0,152	0,165
Плотность, г/см ³	0,775	0,424	0,738	0,642
Массовая теплота сгорания, МДж/кг	42,9	50,1	44,1	45,2
Объемная плотность сгорания, МДж/кг	33247,5	24242,4	32545,8	29309,1

Однако АСКТ обладает некоторыми недостатками, ограничивающими возможность его широкого применения, особенно в разных вариантах использования [30]. 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 [12] что позволяет увеличить полезную нагрузку (таблица 1.2). При этом сокращается на 17% выброс CO₂. По прогнозам мировой объем производства СПГ с 2015 по 2025 год вырастет на 60%, а в России в 5 раз [79]. 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 [61]. Следующим этапом должно стать создание самолетов полностью на СПГ.

Однако для широкого применения СПГ имеется ряд недостатков. Рассмотрим их более подробно.

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 [67]. Газообразное состояние СПГ, по сравнению с нефтяным керосином, требует изменения организации процесса его горения в камере сгорания ГТД. Следовательно, 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 [61]. 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 [61].

С точки зрения экологических преимуществ в сравнении с авиакеросином, актуальным является применение водорода, так как в процессе его сжигания не образуется CO_2 . Сравним достоинства водорода как топлива в сравнении с авиакеросином. Такими достоинствами является:

- теплота сгорания водорода на единицу его массы выше, чем у керосина, что приводит к трех кратному 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 [68]. 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 авиаперевозок (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 ятрофы, 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 1.2). 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.

1.2 Методы получения альтернативных видов топлив

В настоящее время основными источниками сырья авиатоплива для ГА являются нефть, природный газ и уголь. Распределение их долей составляет: нефти - 40 %, угля - 27 %, газа - 23 % [38, 81]. Специалисты Международного Энергетического Агентства (МЭА) дают прогноз о мировых запасах энергоресурсов. Так исчерпание запасов нефти расценивается что произойдет через 40–50 лет, а другие энергоресурсы расцениваются следующим образом: угля через 200–400 лет, газа через 50–70 лет [38, 81].

Как видно, без альтернативных видов топлива авиационной отрасли не обойтись.

Известно [33, 37, 112], что фирма SASOL (ЮАР) имеет промышленную технологию производства топлива из угля. Технологии производства топлива из угля имеют фирмы Shell Malaysia, BP, Exxon Mobile Qatar, Chevron, Conoco-Phillips. США имеют технологию производства авиатоплива из природного газа [81].

Имеются две технологии – прямого и непрямого ожижения угля. При прямом ожижении угля его предварительно высушивают и измельчают (обычно до 40-100 мкм). Затем смешивают с растворителем и полученную массу вместе с водородом под давлением подают в реактор. После гидрокрекинга непрореагировавший водород возвращают в процесс, а полученную "угольную нефть", а также образовавшиеся в реакторе газы, водяной пар и другие компоненты, направляют на разделение, дистилляцию, ректификацию и

гидрирование. Когда уголь сжижен, из него получают моторные топлива [77]. Недостатком такого процесса является высокие температуры – 430...490 °С и давления порядка 30...70 МПа [118].

Второй процесс - не прямое ожижение угля и состоит из двух стадий. Вначале уголь газифицируют смесью кислорода и водяного пара под давлением ~3 МПа и выше и температуре 1100-1700 °С. При этом образуются простые вещества – СО, Н₂, СО₂ и т.п. Затем полученный газ очищают от примесей, для чего подвергают каталитической конверсии водяным паром с целью увеличения количества водорода (реакция $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$) и направляют на каталитический синтез жидких углеводородов, проводимый под давлением 3...7 МПа. Таким образом, "донором" водорода при не прямом ожижении угля является водяной пар.

Обе технологии имеют как достоинства, так и недостатки.

Плюсы технологии прямого ожижения:

- высокий КПД – до 60% при получении топлива.
- кроме СЖТ образуются другие ценные побочных продуктов из "угольной нефти". Но наряду с ценными (например, сольвенты, которые из нефтяного сырья не производят) в этой технологии образуется много экологически опасных отходов.

– меньше удельные выбросы СО₂ в атмосферу за счет меньшего энергопотребления

Минусы:

– экологическая опасность производства, связана с тем, что сама "угольная нефть" является веществом 2-го класса опасности по ГОСТ 12.1.007. Её токсичность (в сотни раз выше, чем нефтепродуктов) обусловлена высокой концентрацией полициклических ароматических углеводородов, которые являются сильными канцерогенами и мутагенами.

– большие затраты, связанные с многостадийной переработкой достаточно грязной и нестабильной "угольной нефти" в топливо. Так как требования по

примесям в авиатопливах (сера, азот и др.) ужесточаются, то и затраты будут только возрастать.

Плюсы технологии непрямого ожижения:

– меньшая экологическая опасность, особенно при применении пылеугольных газификаторов, которые в отличие от слоевых (как на SASOL) не производят угольную смолу.

– более распространённая и апробированная технология.

– получаемые продукты, включая топливо, практически не содержат примесей и могут применяться не только как конечные продукты, но и как добавки для аналогичных нефтяных продуктов.

Минусы:

– более низкий КПД;

– большее энергопотребление (в основном на получение кислорода);

– больше выбросы CO_2 в атмосферу. Углекислотный комбинат SASOL в ЮАР (7 млн СЖТ из угля и 0,65 млн. т. другой химпродукции в год), например, является самым крупным в мире точечным источником выбросов CO_2 в атмосферу (более 30 млн т/год) [43].

Если сравнить характеристики рассматриваемых топлив (см. таблица 1.2), то наиболее перспективным топливом по экологическим и энергетическим характеристикам для ГА является водород. На его недостатки, ограничивающие применение в ГА, указывалось выше. Еще один недостаток – дорогая технология производства водорода, которая состоит в электролизе воды. Такая технология требует затрат электроэнергии, вырабатываемых на электростанциях. Но основным топливом электростанция является органическое топливо [40]. Т.е. чтобы получить 1 Дж энергии, запасённой в водороде, необходимо израсходовать 4...10 Дж энергии вырабатываемой энергетической станцией, что требует сжигания большого количества органического топлива, а значит будет дополнительно осуществляться загрязнение окружающей среды. Одной из перспективных

технологий производства водорода является его производство из спирта, газа или традиционного керосина [40, 49].

Еще одним из альтернативных видов топлива является АСКТ или газовые топлива. Суть технологии производства АСКТ состоит в выделении из природного газа или попутного нефтяного газа фракции требуемого углеводородного состава. Такая технология совпадает с технологией переработки газов с получением кондиционных топливного углеводородного «сухого» газа и других продуктов (рисунок 1.10).

В процессе производства АСКТ из него удаляют механические примеси, глубоко осушают, очищают от сернистых и других нежелательных соединений и освобождают от основной массы пропана, бутанов и других более высокомолекулярных углеводородов (в отдельных случаях также от некоторой доли этана).

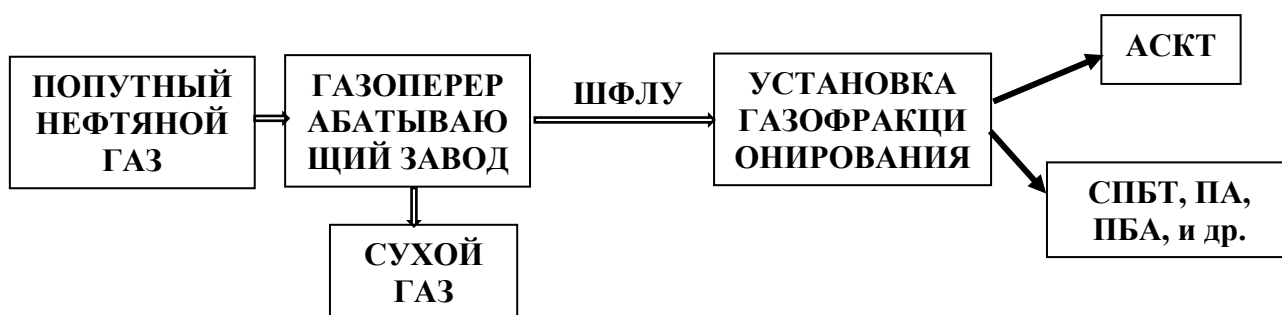


Рисунок 1.10 – Схема разгонки попутного нефтяного газа для получения АСКТ

Технология реализуется практически на всех газоперерабатывающих заводах (ГПЗ) нефтяной и газовой промышленности РФ. Отличием технологий является то, что по одной технологии выделенные из газа углеводороды делят на фракции (пентаны, пропан, бутаны, и т.д.) и газовый бензин, а по другой технологии – все является как один товарный продукт - широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ) (рисунок 1.10).

Однако, как было отмечено выше (см. главу 1.1) для хранения и обеспечения инфраструктуры требуются специальные емкости и оборудование.

Кроме того, совместимость АСКТ с конструкционными и уплотнительными материалами топливной системы ГТД не изучена.

Рассмотренные источники энергии (нефть, газ, водород, уголь и т.д.) относятся к не возобновляемым сырьевым энергоресурсам, сжигание которых приводит к повышению CO_2 в окружающей среде, а значит к парниковому эффекту и потеплению климата на Земле. По данным источников [52, 72] количество CO_2 в окружающей среде составляет примерно 400 ppm, что примерно вдвое превышает его количество до начала промышленной революции XVIII в. По данным тех же источников количество CO_2 в окружающей среде через 25... 30 может достигнуть 500 ppm.

Поэтому сегодня основным источником производства топлив является так называемое возобновляемое сырье – растительная биомасса, бытовые, промышленные или сельскохозяйственные отходы. Как было рассмотрено выше, сжигание топлива из такого сырья не нарушает баланс CO_2 в окружающей среде (см. рисунок 1.8).

Сегодня промышленность не может обеспечить производство нужного количества биотоплива для ГА для замены авиакеросина. Рассмотрим освоённые промышленностью и перспективные технологии производства биотоплива.

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

Первое поколение биотоплива производилась в основном из растительных ресурсов (зерна). При такой технологии возникают вопросы относительно продовольственной проблемы. Так, при производстве биотоплива из пальмового масла необходимо подготовить площади, где растут тропические леса, следовательно, они не будут поглощать CO_2 , что приведет к негативным последствиям. Произведенный из такого сырья этанол имеет недостатки – кристаллизация при низких температурах, меньший запас энергии и отличие химических свойств от нефтяного керосина. Поэтому применение такого биотоплива в ГА практически невозможно.

Существуют технологии получения биоэтанола из сахара методом его сбраживания. За счет химической реакции спиртов и жиров растительных масел можно получить биодизельное топливо (рисунок 1.11) [6, 17, 78, 112].

Сегодня наиболее популярны два процесса получения биотоплива, которые сертифицированы. Первый – по методу Фишера-Тропша производят синтетический парафиновый керосин из различного и отходов, включая биомассы [46]. Суть второго процесса состоит в гидрировании сложных эфиров и жирных кислот (HEFA), где в качестве сырья используют морские водоросли, ятрофа, рыжики, т.е. растительные биомассы. Такой процесс достаточно сложный и с целью обеспечения безопасности полетов необходимы дополнительные испытания и исследования.

Ещё одним процессом производства биотоплива является переработка этанола в топливо (ACJ), что позволяет получить большое количество авиатоплива для ГА. Сегодня биоэтанол производят в США и Бразилии из сахарного тростника и кукурузы. Такое топливо может применяться в ГА без его смешивания с нефтяным керосином [6, 17, 78, 112].

Как видно, каждое из рассмотренных биотоплив имеет свои недостатки и достоинства. Поэтому многие авиакомпании идут по своему пути при производстве биотоплива. Компания Boeing для производства биотоплива использует морские водоросли и ведет исследования использования другого сырья (галофиты). Компания Airbus использует рыжики и ятрофу и ведет исследование по использованию морских водорослей и кустарников малли.

Синтетический парафиновый керосин (SPK), полученный из биомассы, рассматривается как один наиболее перспективных альтернативных видов авиатоплива в ближайшее время.

Биотопливо, полученное из непищевого сырья (биомасса трав и деревьев, жиры и растительные масла), относится ко второму поколению биотоплив (рисунок 1.11). Не взирая на некоторое преимущество, что для выращивания сырья требуются не обработанные земли и задействуется мало техники, данная технология достаточно сложная. Биотопливо производят из лигноцеллюлоза древесины, являющимся сложным полимерным углеводом, и для ее переработки в топливо необходимо провести большое количество химических реакций, требующих и больших затрат энергии.

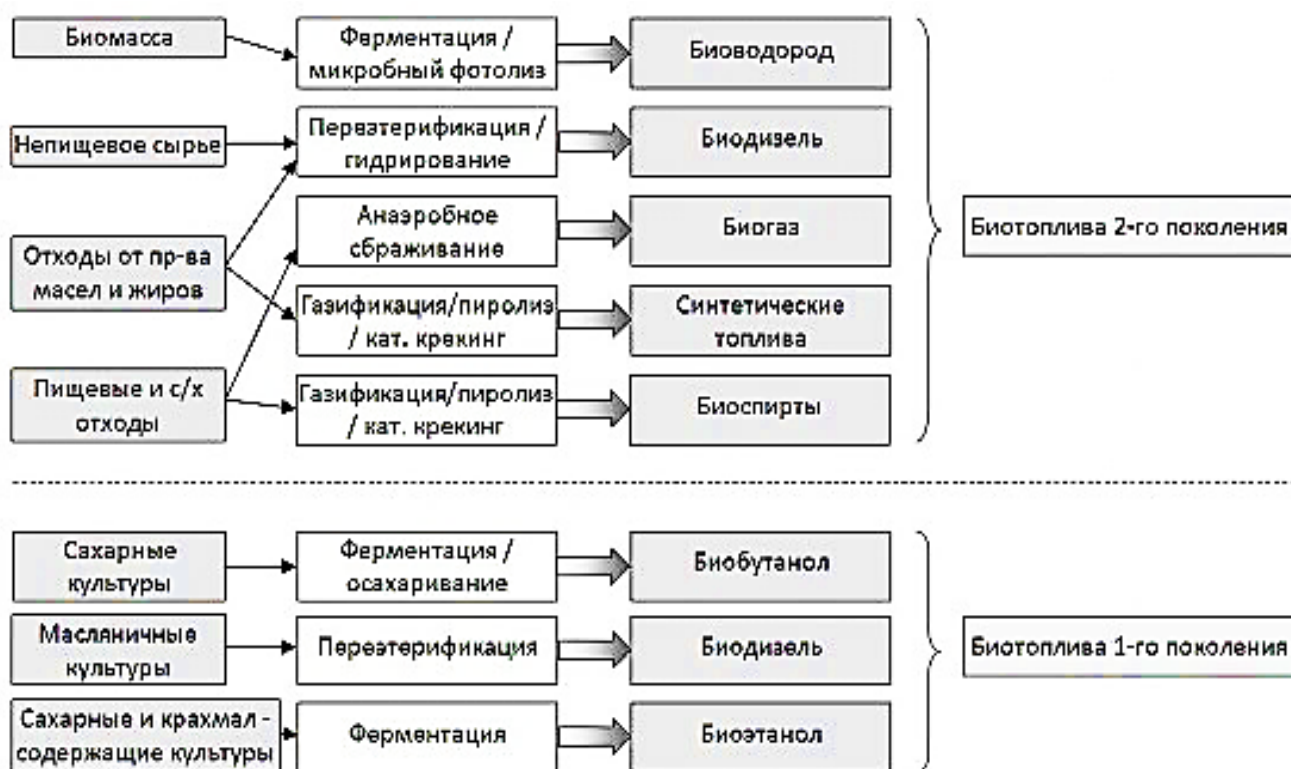


Рисунок 1.11 – Упрощенная классификация и схема получения биотоплив [112]

По данной технологии из лигноцеллюлозы производят биоэтанол и бioneфть. За счет кислотного гидролиза целлюлозы с последующим сбраживанием сахара получают биоэтанол [6, 17, 78, 112]. Технология получения бioneфти сложнее. Сначала биомассу перемалывают, по определенной технологии нагревают с последующим быстрым охлаждением. В дальнейшем полученную нефть перерабатывают в топливо.

Водоросли и масленичные культуры используют для получения биодизеля (рисунок 1.12). Способность водорослей к быстрому размножению и росту может обеспечить производство топлива в 15...200 раз больше, чем из сельскохозяйственных культур.

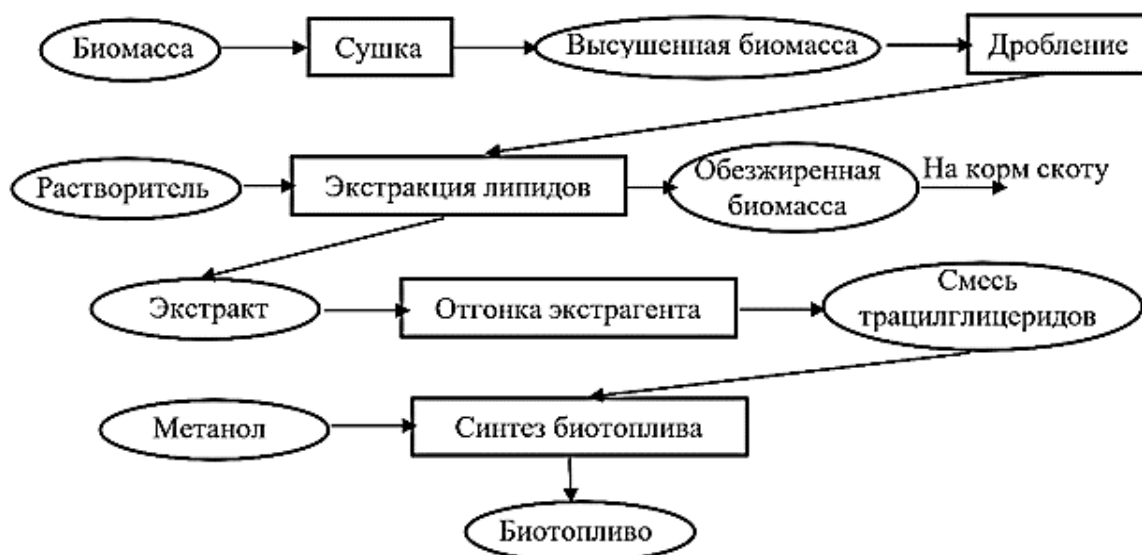


Рисунок 1.12 – Упрощённая схема производства биотоплива 3 поколения

Содержание жиров в сухом весе водорослей может составлять 75...85 %. Условия выращивания и высокая скорость роста водорослей обеспечивают их высокую урожайность в год (30...40 урожаев в год), кроме того, их выращивание не занимает сельскохозяйственные площади. Все это делает водоросли перспективным видом сырья для производства биотоплива третьего поколения. На рисунке 1.12 представлена упрощённая схема его получения [46].

Анализ технологий производства биотоплив показывает, что они не являются совершенными. Доведение их до серийных технологий массового производства потребует еще немало затрат. Тем не менее дальнейшее развитие ГА, очевидно, связано с применением альтернативных видов топлива.

Наиболее перспективной технологией производства биотоплива является технология производства из возобновляемых источников сырья, а именно – водорослей, которое будет более рентабельными и экологически чистыми (с минимальным выбросом CO₂ в атмосферу).

1.3 Влияние применяемых авиатоплив на безопасность полетов и окружающую среду

Объем перевозок и количества задействованных при этом самолетов ежегодно возрастает [84, 92], что приводит к увеличению потребления авиакеросина в ГА, при сжигании которого происходит выброс вредных веществ в атмосферу. Поэтому экологи и общественность осуществляют давление на авиакомпания по снижению загрязнений атмосферы от деятельности ГА. В свою очередь ИКАО тоже ужесточает экологические требования по вредным выбросам от ГТД [20, 54, 55, 95]. Такое положение заставляет авиакомпании вести поиск по применению в авиации альтернативных источников энергии, особенно пот расширению сферы применения биотоплива.

Известно, что ИКАО решила создать систему торговли квотами на выбросы (ETS) в мировых масштабах. Ведущие представители авиационной промышленности в 2008 г. приняли решение о повышении к 2020 г. топливной эффективности ВС на 1,5%. В ГА с 2020 г. вводятся ограничения на выбросы вредных веществ. В дальнейшем (к 2050 г). выбросы углекислого газа планируется сократить на 50% в сравнении с 2005 г. Для этого Европейская комиссия настаивает на том, чтобы ГА уже с 2020 г. применяла около 4% биотоплива [28, 50, 71].

Сегодня большое внимание уделяется экологической безопасности авиатоплива [103]. На безопасность полета существенное влияние оказывает качество применяемого авиатоплива (рисунок 1.13) [10, 91]. 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 [2, 91].

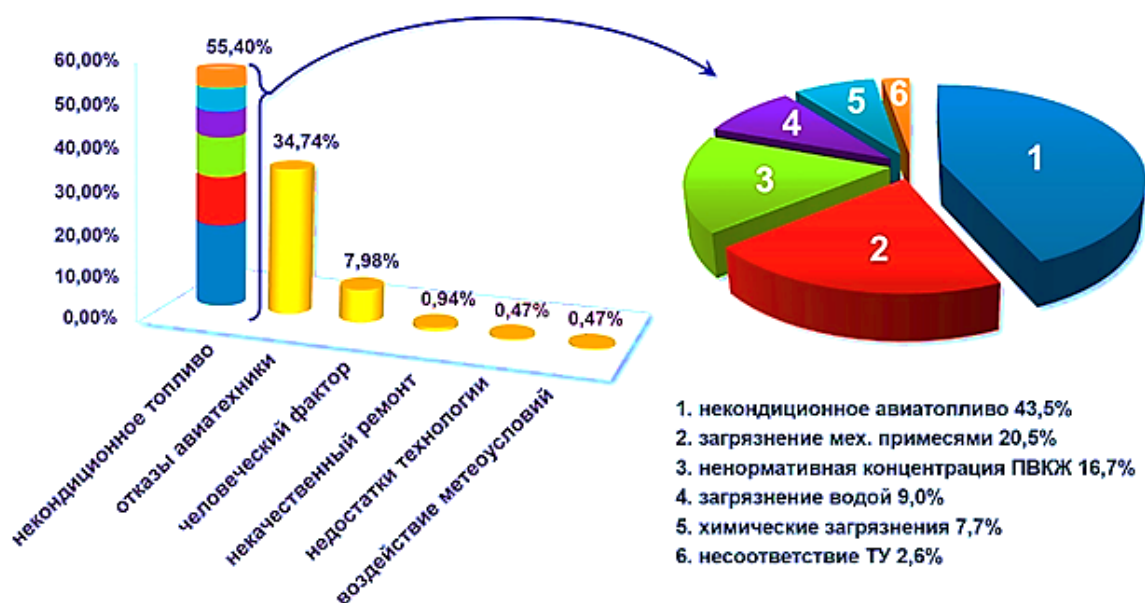


Рисунок 1.13 – Распределение причин инцидентов и авиационных происшествий, отнесенных к коду «028 топливная система»

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. Выявлено изменение поставщика присадки, используемой при производстве авиатоплива.

В аэропортах Домодедово, Печора в том же 2007 году обнаружено наличие нехарактерных серосодержащих органических веществ в авиатопливе. Установлено невыполнение контрольных операций, предусмотренных технологией производства авиатоплива на НПЗ.

В аэропортах Амдерма, Талакан, Шереметьево в период с 2011 по 2014 гг. выявлено несоответствие качества авиатоплива по показателю "Удельная электрическая проводимость" из-за наличия загрязнений.

Из рисунка 1.13 видно, что причинами авиакатастроф являются самые разные факторы. Одной из причин отказов авиационных двигателей, приводящим к инцидентам и катастрофам, является применение некондиционных ГСМ [2, 27, 80].

В топливных системах ВС и АД топливо выполняет следующие основные функции [18, 42, 57]:

- 1) энергетическую – получение теплоты (энергии) и преобразование её в кинетическую энергию газов;
- 2) смазывающую – смазывание узлов и агрегатов топливной системы;
- 3) охлаждающую – охлаждение конструкционных и смазочных материалов;
- 4) рабочего тела – в качестве гидравлической жидкости в исполнительных механизмах;
- 5) защитную – защита конструкционных материалов от коррозии.

Исходя из функций, а также из технологических, экономических, экологических и прочих условий определяются и основные требования к АТ (рисунок 1.14).

Из данных рисунка 1.14 видно, что некоторые требования могут быть отнесены сразу ко всем группам (например, требования по полноте сгорания АТ), а некоторые находятся во взаимном противоречии (например, снова требования по полноте сгорания и низкой конечной стоимости), поэтому качество АТ должно быть компромиссным или иначе – рациональным. Недостаточное качество АТ отрицательно повлияет на надёжность техники и безопасность полётов, избыточное приведёт к излишним финансовым затратам.

Кроме того, сегодня остро встает вопрос о выбросах продуктов сгорания авиатоплив в атмосферу, а также их объемах и составах. Современная ГА при использовании авиатоплив для ГТД ответственна за 2 % мировой эмиссии CO_2 [94]. Сегодня в мире массово применяются ВС двух фирм: Boeing – 39,7 % и Airbus – 28,7 % [45]. По данным того же источника 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 CO₂. Сравним количество выброшенных в атмосферу загрязняющих веществ, выбрасываемых различными типами ВС (таблица 1.4).



Рисунок 1.14 – Требования к авиационным топливам

Таблица 1.4. Сравнительная характеристика выбросов в атмосферу загрязняющих веществ в зависимости от типа ВС [45].

Тип ВС	Величина выбросов, кг на час полета		
	CO	CH ₄	NO _x
Ил-86	61	9	25
АН-148	27,5	0,7	20,4
ТУ-204	4,3	0,28	23,3
Ту-154	109	34	18
Як-42	10	3	11
Airbas-310	25,8	0,5	23,2
Boing-737-400	11,8	0,1	8,3
Boing-777	61,4	2,3	53,6

Airbas-320	17,6	0,2	10,8
McDonnell Douglas 81	6,5	0,2	12,3

Как видно из таблицы 1.4, новые ВС, такие как АН-148 и Ту-204, не уступают зарубежным по величине выбросов, а старые образцы ВС составляют менее 5 % от общего числа.

Рассмотрим более подробно состав выбросов в атмосферу. Как известно конечным продуктом сгорания авиатоплива являются отработанные газы, содержащие ряд вредных веществ. В первую очередь это чадный газ (СО), несожженные углеводороды, оксиды серы и азота, сажа и др. (рисунок 1.15) [94, 102, 103].

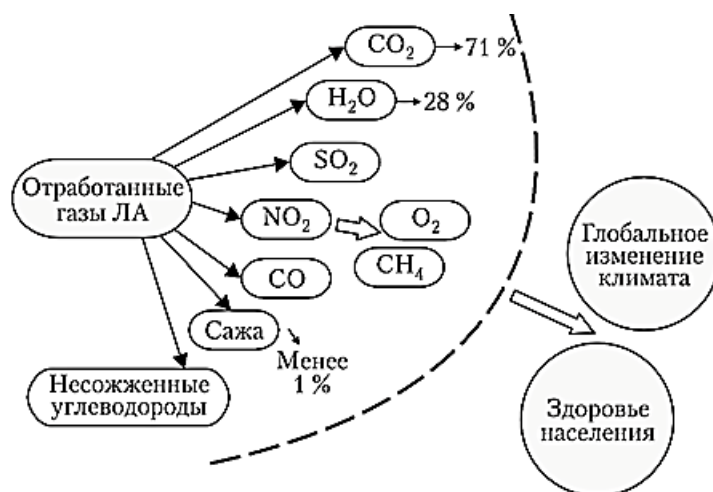


Рисунок 1.15 – Состав отработанных газов ВС [94, 102, 103]

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 [83]. 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 [81, 94, 101, 102, 111]. 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 [47, 65].

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.

Выводы по 1 главе

1. Проведен анализ развития и применения альтернативных видов авиатоплива в авиации, а также проводимых работ в этом направлении показавший, что мировые тенденции применения альтернативного авиатоплива идут по пути получения наибольшего экономического и экологического эффекта при их использовании.

2. Анализ показал, что каждое из рассмотренных альтернативных авиатоплив имеет свои недостатки и преимущества, на сегодняшний момент наиболее перспективным является биотопливо третьего поколения.

3. Установлено, что наиболее перспективной технологией производства биотоплива является технология производства из возобновляемых источников сырья, а именно – водорослей, которая будет более рентабельной и экологически выгодной (с минимальным выбросом CO₂ в атмосферу).

2 Теоретические и расчётные исследования сравнительных свойств биотоплив и традиционных керосинов

2.1 Сравнительный анализ свойств применяемых и перспективных авиационных топлив

Значение гражданской авиации для мировой экономики в современных условиях переоценить сложно.

Вопросы топливной эффективности всегда были одной из приоритетных задач развития ГТД и применяемых топлив. Появление двухконтурных и турбовинтовых двигателей привело к повышению экономичности ВС. В сравнении с пассажирскими ВС 50-70-х годов современные ВС стали экономичнее на 50...70 % [19, 82].

Применяемые топлива на ВС производят методом перегонки из нефти. В настоящее время запасы нефти истощаются, а цены на ее добычу и переработку растут (рисунок 2.1) [40, 63]. В этих условиях становится актуальным вопрос исследования и применения биотоплив на современных ВС. Разработкой альтернативных видов топлива активно занимаются такие страны как США, Китай, страны Евросоюза, Канада и др. Сейчас уже в промышленном масштабе производится из угля и природного газа синтетический керосин и допущен к применению на ВС согласно спецификации ASTM D 7566-09 (Стандарт на топливо для авиационных газотурбинных двигателей, содержащее синтезированные углеводороды). Также имеются опытно-промышленные установки по производству биотоплива из водорослей. Следует признать, что в вопросе создания биотоплив Россия уступает названным странам.



Рисунок 2.1 – Прогноз добычи нефти [40]

Применение альтернативных видов топлива актуален и в Российской Федерации. Однако это в большей степени связано с применением газовых топлив [18]. Применение альтернативных видов топлив на ВС может сделать авиаперевозки экологичными и более доступными. Мировое сообщество серьезно ставит вопрос снижения выбросов от использования авиации, при том, что это составляет всего 2...3% [49, 99].

Поэтому, с целью повышения экологичности применяемого топлива все больше стран начинают разрабатывать технологии по производству биотоплив (см. глава 1), главным образом биоэтанола (рисунок 1.6) [6, 74].

В основном уделяется внимание разработке технологий по производству биотоплива из так называемых возобновляемых источников сырья [105].

Как было отмечено в главе 1, такие технологии позволяют не нарушать экологический баланс окружающей среды (рисунок 1.8) [99].

Анализ различных литературных данных [4, 7, 15, 74, 90, 99] не позволяют сделать однозначную оценку влияния био и синтетических керосинов на работоспособность силовой установки, так как их эксплуатационные свойства будут зависеть от технологии производства, степени переработки, состава и исходного сырья.

Таким образом, видна необходимость проведения сравнительной оценки характеристик биотоплив с традиционными керосинами. Для практического применения предпочтительнее проведение экспериментальных работ по определению параметров топлив, включая и летные испытания. Однако это затруднительно как по трудозатратам, так и с экономической точки зрения. Поэтому в работе для начальной оценки проведен анализ физико-химических свойств различных биотоплив, их смеси с традиционными марками керосина и самими керосинами для принятия решения по их применению на ВС.

Применяемое топливо влияет на надежность двигателей, их удельный расход и тягу. В зависимости от типа ВС масса заправляемого топлива может составлять 40...65 % от общей массы ВС, которое проходит через трубопроводы, насосы, топливо-регулирующую аппаратуру, а значит его качество будет влиять на их работоспособность и безопасность полетов. Это диктует необходимость предъявления жестких требований к качеству применяемого топлива [18, 36, 48].

Наиболее перспективным направлением применения альтернативных топлив является создание комбинированных смесей. То есть из растения производится горючее, которое имеет неплохие, но недостаточные для непосредственного применения в ВС характеристики. Для улучшения физико-химических свойств в него вводят специальные присадки, изготовленные из нефтяного сырья. Вводимые присадки могут ухудшить экологические параметры такой смеси, но повысят другие показатели, благодаря чему такая смесь может быть эффективнее применяемого керосина. Наиболее важным в этом случае является выдерживание баланса между ценой на разработку, количеством вредных выбросов, получаемой тягой и удельным расходом топлива. Правильное сочетание этих показателей может обеспечить сокращения вредных выбросов.

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.

Как было сказано выше, одним из наиболее перспективных является синтетический авиакеросин, изготавливаемый по спецификации ASTM D 7566-09 [86], который допущен к применению на ВС. Это смесь синтетического парафинового керосина (SPK) с традиционными керосинами Jet A-1. Такой керосин (SPK) производится по технологии Фишера-Тропша (FT) из угля или природного газа по реакции:



Для снижения окисления SPK в топливо вводятся антиокислительные присадки. FT SPK из угля производит компания Sasol из Южной Африке.

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 уплотнения для предотвращения утечки топлива. Минимальное содержание ароматических соединений должно быть не меньше 8 % [46, 73, 77, 78, 94]

В результате гидрирования жирных кислот и эфиров (HEFA) получают еще один вид биотоплива, где сырьем для получения такого топлива являются растительные виды биомассы (морские водоросли, камелина, ятрофа и рыжики). А в результате гидроочистки масел получают еще один вид биотоплива HVO. Топливо может быть получено из широкого спектра растительных масел. Суть данной технологии состоит в том, масла (триглицериды) вступают во взаимодействие с водородом под достаточно высоким давлением с целью удаления из них кислорода. Углеводородные цепочки, полученные в результате такой технологии, являются химически аналогичны дизельному топливу, полученному из нефти. При такой технологии образуется побочный продукт – пропан, который тоже можно применять как топливо.

Термины HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) и HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) применяют в качестве обозначения источников сырья таких топлив – растительные масла и жиры.

При производстве биотоплива по технологии HVO основными источниками сырья являются в первую очередь таловое масло, как побочный продукт бумажно-целлюлозного производства, соевое, рапсовое или кукурузное масла. Данная технология позволяет в качестве сырья использовать и животные жиры. По данным исследователей [39, 74], сырье для производства биотоплива по технологии HVO распределяется следующим образом: отходы скотобоен составляют 35 %, растительные отходы, включая и другие отходы животных – 23 %, таловое масло – 22 %, а пальмовое – 15 % и животные жиры – 5 %.

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 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.

Топливная система ВС, ее компоновки (фильтроэлементы, насосы, регулирующая аппаратура и т.д.) настроены на применение керосина, имеющего определенные физико-химические свойства. Применение биотоплива [15], имеющего другие свойства, потребует внесения изменения в конструкцию топливной системы 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. Как 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 топливной системы 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 ТС-1, Jet A-1. Такое сравнение позволит определить наиболее приемлемые пропорции этих для использования в ГА.

Сравним некоторые свойства известных марок керосинов и три варианта биотоплива в смеси с керосином Jet A-1 в различных пропорциях (таблица 2.1). Используя данные табл. 2.1 и данные источников [11, 18, 21, 23, 24, 36, 42, 87], проведем соответствующие расчеты.

Таблица 2.1. Сравнительные характеристики керосинов, биотоплив и их смесей с керосином.

Характеристики топлива	ТС-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 ³	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 ³ x 10 ³	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 некопящего 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 и определяется его химическим составом и качеством производства при нефтепереработке. От нее зависит взлетная масса ВС, а, следовательно, его энерговооруженность. Например, уменьшении плотности топлива на 40 единиц ведет к снижению дальности полета примерно на 5 %. Плотность топлива зависит от температуры – при нагревании из-за теплового расширения плотность керосина уменьшается. Анализ исследуемых топлив и биосмесей (таблица 2.1) показывает, что они близки по значениям и имеют удовлетворительные значения плотности.

Фракционный состав авиатоплива является важнейшей его характеристикой. Анализ показывает (таблица 2.1), что добавление 50 % FT SPK в керосин Jet A-1 улучшает данный его показатель. Хорошие результаты имеет 100 % FT SPK.

Важнейшим свойством топлива является низшая теплота его сгорания. Она определяет теплотворную способность применяемого топлива, от которой зависит топливная эффективность ВС. Высокие значения теплоты сгорания применяемого топлива приводят к повышению топливной эффективности ГТД. Как видно, по данному показателю анализируемые нефтяные керосины, биотоплива и их смеси имеют примерно одинаковые значения.

Для дальнейшей оценки влияния свойств топлива на характеристики ГТД целесообразно провести сравнение такого показателя топлив как его объемная теплота сгорания, которая определяется как произведение массовой теплоты сгорания на плотность топлива. Из таблицы 2.1 видно, что множители (плотность) исследуемых керосинов, биотоплив и их смесей имеют небольшие отличия, что приводит и к небольшим отличиям, и в рассматриваемом показателе.

Химический состав нефтяных керосинов состоит из достаточно большого количества углеводородов [21, 29, 36]. 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

Являясь стабильной структурой парафины не вступают во взаимодействие с металлами, красками и эластомерами, с которыми контактируют в процессе жизненного цикла. Имея в составе высокое отношение водорода к углероду обеспечивает им высокое тепловыделение на единицу веса, что делает их более чистыми при горении. Циклопарафины имеют более низкое в своем составе соотношение водород-углерод, уменьшается их тепловыделение на единицу веса, но увеличивается плотность. Циклопарафины также являются стабильными и при горении не коптят. Основное их достоинство состоит в том, что их температура начала кристаллизации ниже, чем у парафинов с одинаковым числом атомов углерода.

Ароматические соединения имеют свойство вызывать набухание некоторых герметиков и каучука. Ароматические соединения имеют тенденцию образовывать нагары и горят с копотью. Из-за этих свойств их процентное соотношение в топливе ограничивают. Так максимальная концентрация ароматических веществ в топлива составляет от 20 до 25 процентов по объему.

Олефины – ненасыщенные углеводороды - и имеют более низкое отношение водорода к углероду. Они являются наиболее реакционноспособными из углеводородов и способны реагировать со многими

материалами. Например, они соединяются с кислородом воздуха с образованием лака или резиноподобных материалов и могут реагировать друг с другом с образованием полимеров с более высокой молекулярной массой. Содержание олефинов в топливах ограничивается.

Количество тех или иных углеводородов в топливе значительно влияет на его показатели.

Анализ наличия ароматических углеводородов в сравниваемых топливах показывает (таблица 2.1), что в биотопливе их содержание значительно более низкое по сравнению с традиционным керосином. Смешивание биотоплива и керосина приводит к некоторому увеличению их содержания.

Следующим показателем качества топлива является его кинематическая вязкость. Кинематическая вязкость определяет прокачиваемость топлива, качество его распыла в камере сгорания смазывающую способность. Кинематическая вязкость зависит от температуры. 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 2.1) имеют приемлемые значения вязкости при температуре минус 20 °С. Биотопливо имеет меньшую вязкость в сравнении с керосинами, что является с точки зрения перечисленных характеристик предпочтительнее.

Еще одной важной характеристикой применяемых топлив является высота некоптящего пламени (максимальная высота некоптящего пламени (МВНП)), которая характеризует такой показатель топлива как нагарообразование. Способ ее определения состоит в замере высоты пламени, определяемой в миллиметрах, достигаемая до появления дыма, при сжигании топлива в стандартной лампе в определенных условиях. МВНП зависит от состава углеводородных фракций в топливе:

$$h = 0,48\Pi + 0,32Ц + 0,20A \quad (2.2),$$

где h – точка дымления, мм;

Π , Ц , А – соответственно содержание парафиновых, циклановых и ароматических углеводородов, % масс.

Как видно ароматические углеводороды демонстрируют наибольшее влияние на МВНП. Т.е. видна взаимосвязь между величиной некоптящего пламени и объемным содержанием ароматических углеводородов в исследуемых топливах. Следовательно, можно сказать, чем ниже значение высоты некоптящего пламени применяемых топлив, тем меньше его сгорает, а значит, 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 имеют коррозионную агрессивность, 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 ниже теплоту сгорания массовой единицы, чем водорода. Это позволяет провести сравнение исследуемых топлив по такому показателю как массовая теплота его сгорания. Как видно (таблица 2.1) 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. Кроме того, увеличение отношения Н/С приводит к снижению плотности топлива, которая, как видно из таблицы 2.1, у чистого биотоплива ниже плотности нефтяных керосинов и их смесей с биотопливом.

Термическая стабильность является важным показателем топлива. Ее оценку проводят в статических и динамических условиях. В динамических условиях – на

приборе JFTOT. Автору работы не удалось самостоятельно провести данные исследования. Анализ исследований авторов [114, 115, 120] позволяет сделать вывод, что биотопливо и смеси с керосином имеют термостойкость незначительно ниже керосина Jet A-1. Это можно объяснить различием химического состава биотоплива и керосина. Результаты тех же авторов [114, 115, 120] показывают, что введение в смесь биотоплива и керосина присадок – тетралина и декалина – значительно повышает устойчивость такой смеси к окислению как при его использовании, так и хранении.

Таким образом, проведенное в работе сравнения основных свойств традиционных керосинов, биотоплива, а также их смесей показал, 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. Поэтому определение физико-химических свойств как самого биотоплива, так и его смеси с традиционным керосином при различных условиях их эксплуатации, а также их влияния в этих условиях на работу топливно-регулирующей аппаратуры двигателя, насосов и т.д., их взаимозаменяемости требуется дополнительных эксплуатационных исследований.

В целом биотоплива, и особенно их смеси с нефтяными керосинами, отвечают предъявляемым требованиям к авиационным топливам и могут быть применены на ВС.

2.2. Теоретическое обоснование и расчетная модель выбора топливной смеси с разными соотношениями биотоплива и керосина

ИКАО ужесточает требования по вредным выбросам в атмосферу в процессе использования гражданской авиации, что влечет за собой поиск новых видов топлива, имеющих более высокую экологическую безопасность. Известно [10, 18, 21, 36], что авиационному топливу кроме экологических требований предъявляются и другие требования, установленные нормативными документами. 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.

Как было отмечено выше, сегодняшние технологии производства биотоплива из различных видов сырья позволяет получить его с показателями близкими к показателям авиационного керосина, но полностью его заменить пока не удастся. 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. Биотопливо и керосин имеют свои показатели качества. 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. Это позволит в дальнейшем оценить влияние состава смеси на ее характеристики.

Министр ВМС США Рэй Мабиус в 2009 г. сказал, что в военно-морских силах к 2020 году возрастет доля применения альтернативного топлива, которая будет составлять не менее 50 % от общего потребляемого объема и что на такое топливо будут переведены все авиационные и корабельные части^{1,2,3}. Для осуществления данного решения в настоящее время проводятся различные испытания, включая и летные, а также проводится сертификация ВС по применению на них биотоплив.

Как было отмечено в главе 1, СССР в свое время был лидером по разработке и реализации применения в авиации альтернативных видов топлива. Прежде всего речь шла о применении газа в авиации – Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР 1981 г. «Об использовании газа на транспорте».

Наиболее известным сертифицированным для применения на борту ВС, согласно стандарту ASTM D 7566-09, является авиакеросин SPK (FT-SPK). Как отмечалось выше, данный керосин производится по технологии Фишера-Тропша из различных источников сырья. В качестве сырья наиболее часто используется уголь, биомассы или природный газ. Известно [22, 63], что данный синтетический керосин применяется в смеси с традиционным керосином Jet A-1 в различной пропорции.

¹ Американские военные перейдут на альтернативное топливо [Электронный ресурс] – 2010. Режим доступа: <https://lenta.ru/articles/2010/11/23/biofuels/> (дата обращения: 20.03.2020).

² Американцы испытали самолет на чистом биотопливе [Электронный ресурс] – 2012. Режим доступа: https://vpk.name/news/78411_amerikancy_ispytali_samolet_na_chistom_biotoplive.html (дата обращения: 20.03.2020).

³ Самолет впервые полетел на 100-процентном биотопливе [Электронный ресурс] – 2016. Режим доступа: <https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fnp1.ru%2Fnews%2F2016%2F09%2F20%2Fbio> (дата обращения: 20.03.2020).

Целесообразно провести оценку влияния процентного содержания биотоплива в наиболее широко применяемых керосинах Jet A-1 и ТС-1 на получаемые служебные характеристики смеси. То, что такие смеси имеют отличительные физико-химические свойства от керосинов, подтверждается исследованиями других авторов [15, 34, 73]. Как отмечают авторы [15, 18] применение смесей керосина и биотоплива оказывает влияние на процесс горения в камере сгорания ГТД. Можно отметить, что изменение теплоты сгорания такой смеси в итоге оказывает влияние на тягу и удельный расход топлива ГТД [15, 25].

Видно, что проведение сравнительной оценки получаемых показателей смеси биотоплива и керосина представляет не только теоретический, но и практический интерес. Для разработки расчетной модели по оценке свойств смеси биотоплива и керосина в работе использовались расчетные формулы авторов [29, 82]. Для проведения расчетов использовали показатели керосинов и синтетического биотоплива SPK, представленных в таблице 2.2 [22].

Такой расчёт позволяет провести сравнительную оценку основных показателей топливных смесей с целью выбора процентного соотношения в смеси биотоплива и традиционных керосинов [11, 29, 42, 57, 69].

Таблица 2.2. Основные показатели свойств нефтяных керосинов и SPK

Характеристики топлива	ТС-1	Jet A-1	100 % SPK
кинематическая вязкость при температуре -20 °С, сСт	4,3	4,7	3,5
плотность при 15 °С, г/см ³	0,786	0,8148	0,7599
фракционный состав:	150,0	173,8	158,6
10 % отгона, °С	250,0	259,8	220,9
98 % отгона, °С			
массовая доля серы, %	0,17	0,19	0,0
низшая теплота сгорания, МДж/кг	43,2	43,1	43,8
объемная теплота сгорания, МДж/м ³ x 10 ³	33,9	35,1	33,2

объемная доля ароматических углеводородов, %	17,0	18,3	0,5
высота некоптящего пламени, мм	26,0	22,0	40,0
содержание углерода, %	86,0	86,1	84,6
содержание водорода, %	14,0	13,7	15,3
соотношение водород / углерод	0,16	0,16	0,18

Вначале рассмотрим изменение основных свойств авиатоплив. В первую очередь к таким относятся плотность топлива (ρ) и массовая теплота сгорания (H_u). На рисунке 2.1 и 2.2 представлены эти зависимости 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 2.2 видно, что биокеросин имеет более высокую массовую теплоту сгорания и его добавление в керосин прямо пропорционально ее повышает.

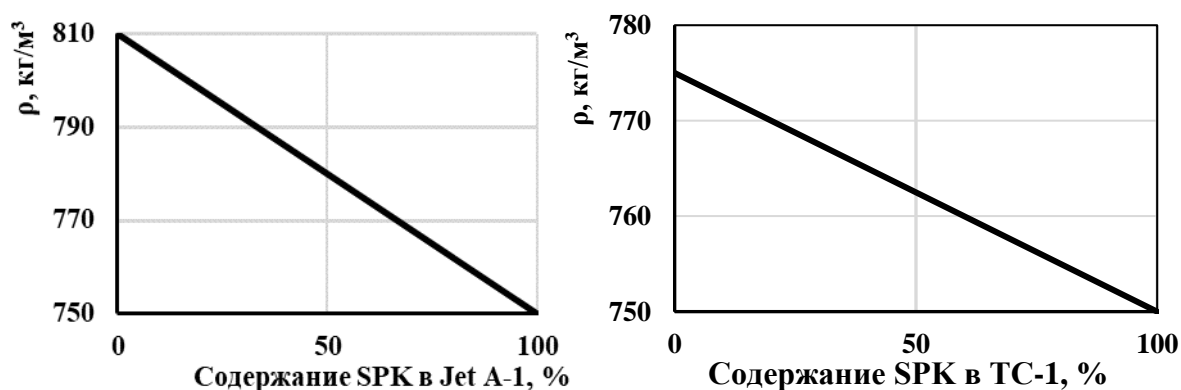


Рисунок 2.1 – Зависимость плотности смеси топлива от её состава

Проведем анализ такого изменения плотности топливовоздушной смеси от процентного соотношения в ней биокеросина. Как видно 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. Известно [21, 36, 29], что с изменением температуры меняется и плотность топлива, поэтому применение 100 % биокеросина в качестве основного топлива может привести к сокращению дальности полета на 10 %.

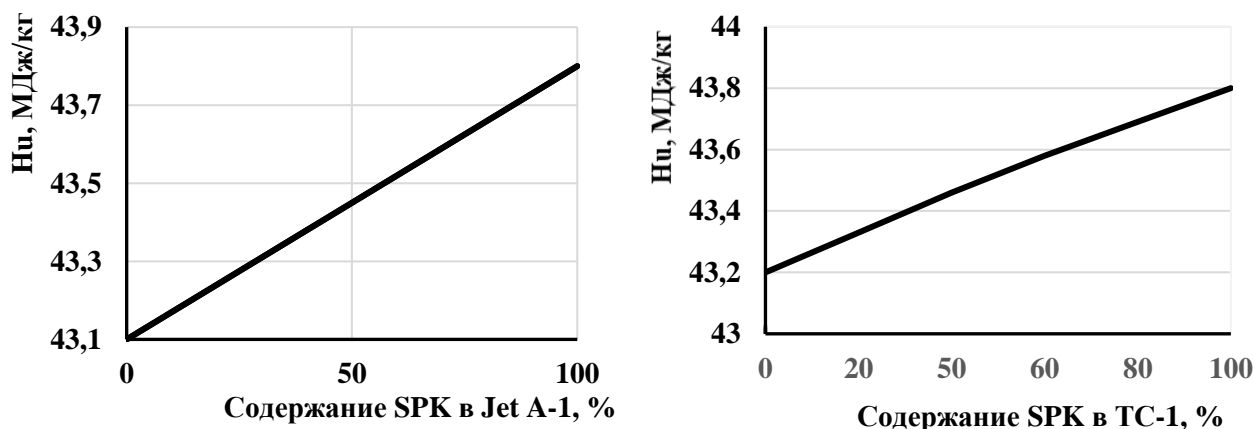


Рисунок 2.2 – Зависимость массовой теплоты сгорания смеси топлива от её состава

Важной характеристикой топлива является объёмная теплота сгорания (H_v), которая позволяет провести сравнение ВС по такой характеристике как его энерговооружённость. Объёмная 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 объёмная теплота сгорания также имеет прямолинейную зависимость (рисунок 2.3).

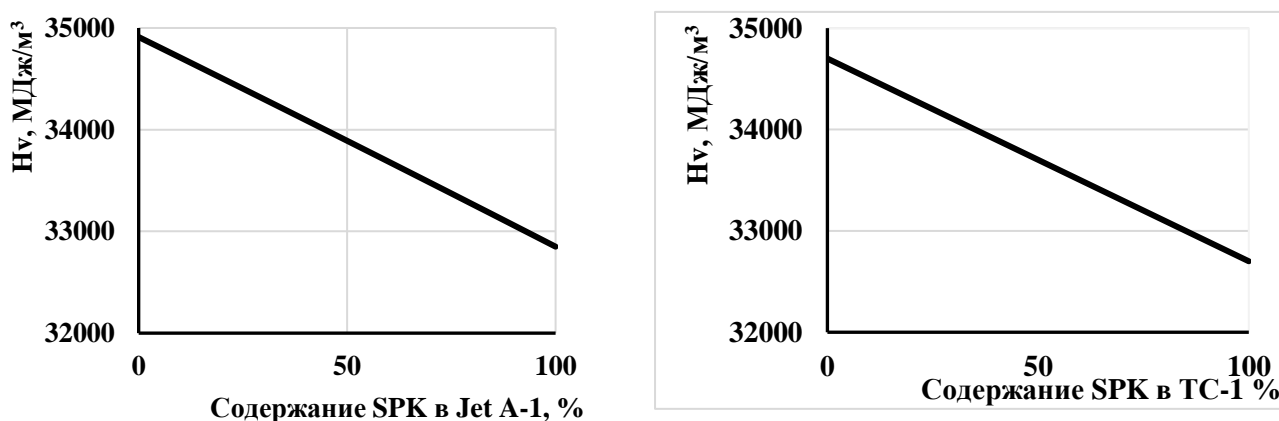


Рисунок 2.3 – Зависимость объёмной теплоты сгорания смеси топлива от её состава

Для осуществления процесса горения в качестве окислителя в ГТД используют кислород, содержащийся в воздухе. Следовательно, при известном химическом составе применяемого топлива и необходимой массе окислителя для полного окисления (сгорания) применяемой топливовоздушной смеси (таблица 2.3) потребуется следующая масса воздуха (стехиометрический коэффициент (L_0)):

$$L_0 = 4,33 \cdot G_0 = 4,33 \cdot (2,66g_C + 7,94g_H + g_S) \quad (2.3),$$

где G_0 – секундный расход массы окислителя, кг/с;

4,33 – коэффициент, учитывающий массу потребного воздуха, исходя из содержания в нём кислорода, равного 0,232 кг_{кислорода}/кг_{воздуха};

g_C, g_H, g_S – массовые доли основных элементов топлива: углерода, водорода и серы.

Таблица 2.3. Масса окислителя, необходимая для полного окисления (сгорания) элементов топлив (стехиометрическое соотношение)

Реакция	Расход кислорода, кг	Расход воздуха, кг
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\approx 2,66$	$\approx 11,52$
$H_2 + 0,5 \cdot O_2 \rightarrow H_2O$	$\approx 7,94$	$\approx 34,38$
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	$\approx 1,00$	$\approx 4,33$

Стехиометрический коэффициент, как известно [41, 76], 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:

$$L_0 = \left(\frac{8}{3} g_C + 8g_H\right) / \psi_{O_2} \quad (2.4),$$

где L_0 – стехиометрический коэффициент, кг_{топлива}/кг_{воздуха};

g_H и g_C – массовая доля водорода и углерода соответственно в топливе;

ψ_{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:

$$\alpha = G_o / (L_o \cdot G_T) \quad (2.5),$$

где G_T – секундный расход массы топлива, кг/с, принимаем равным 4000 т/ч.

В зависимости от значения коэффициента α в ГТД при организации процесса горения различают богатую смесь (избыток топлива), когда значение коэффициента находится в диапазоне от 0,85 до значений 1,25 и бедную смесь (избыток воздуха), когда значение коэффициента α свыше 1,25.

Важным показателем процесса горения в камере сгорания является температура продуктов сгорания. Данный показатель влияет как на получаемую тягу ГТД, так и на удельный расход топлива. Для определения температуры продуктов сгорания вначале проведем расчет массы газа через двигатель, которая зависит от соотношения углерода и водорода в топливе и стехиометрического коэффициента.

Секундный расход массы газа через двигатель можно рассчитать по формуле:

$$G_r = G_T + G_o \quad (2.6),$$

где G_o – секундный расход массы окислителя, кг/с.

Подставляя, получим формулу для расчёта массы газа через ГТД:

$$G_r = G_T \cdot (1 + \alpha \cdot L_o) = G_T \cdot [1 + \alpha \cdot (1 + 2g_H)/0,087] \quad (2.7),$$

Результаты расчетов потребной массы газа от состава смеси применяемого топлива в абсолютных значениях, а также в процентном соотношении представлены на рисунках 2.4 и 2.5.

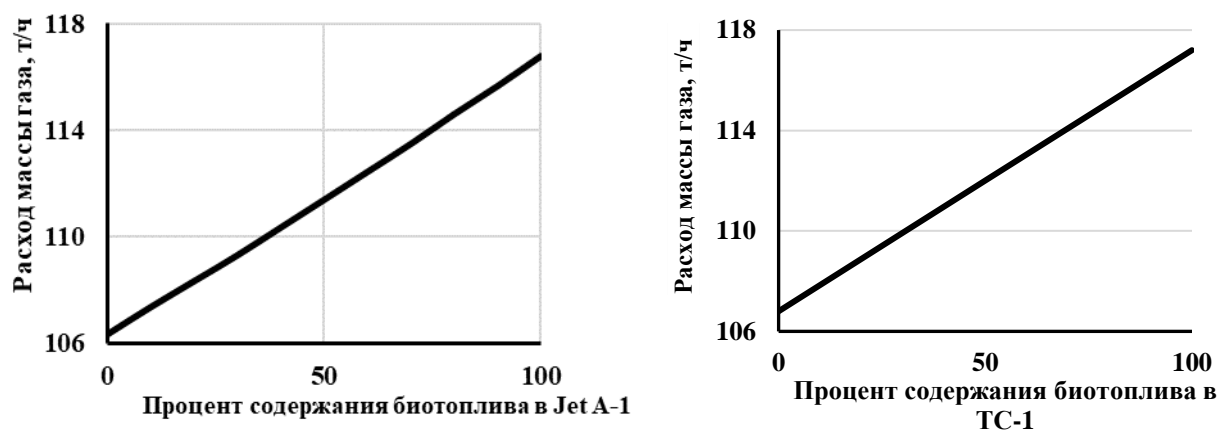


Рисунок 2.4 – Потребная масса газа для окисления смеси топлива в зависимости от её состава

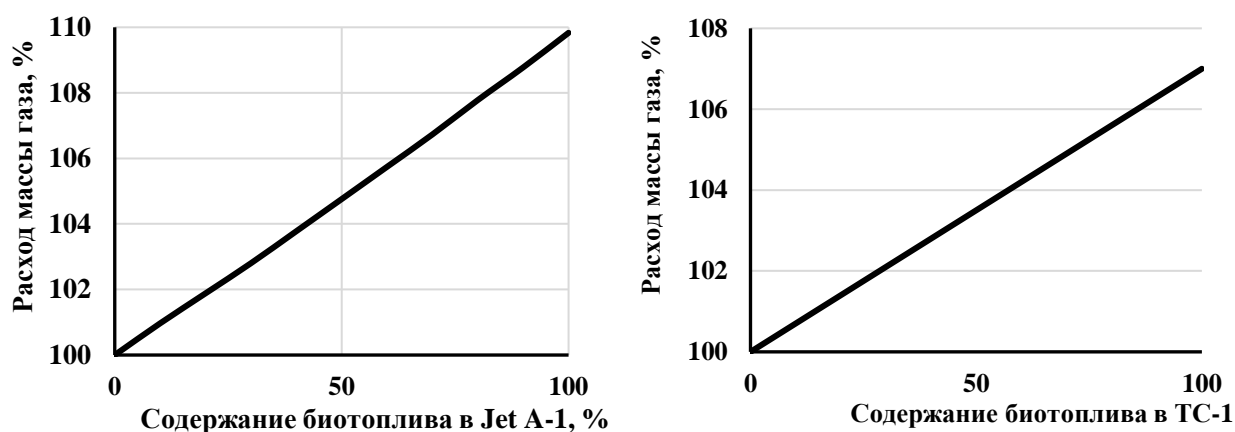


Рисунок 2.5 – Потребная масса газа для окисления смеси топлива в зависимости от её состава

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:

$$T_{\Gamma} = \frac{H_u}{C_{pm} \cdot (1+L_0)} \quad (2.7),$$

где T_{Γ} – температура продуктов сгорания, К/кг;

C_{pm} – средняя изобарная теплоёмкость продуктов сгорания, кДж/(кг·К).

Результаты расчета зависимости температуры продуктов сгорания от состава применяемой топливной смеси в абсолютных значениях и в процентных соотношениях соответственно представлены на рисунке 2.6 и 2.7.

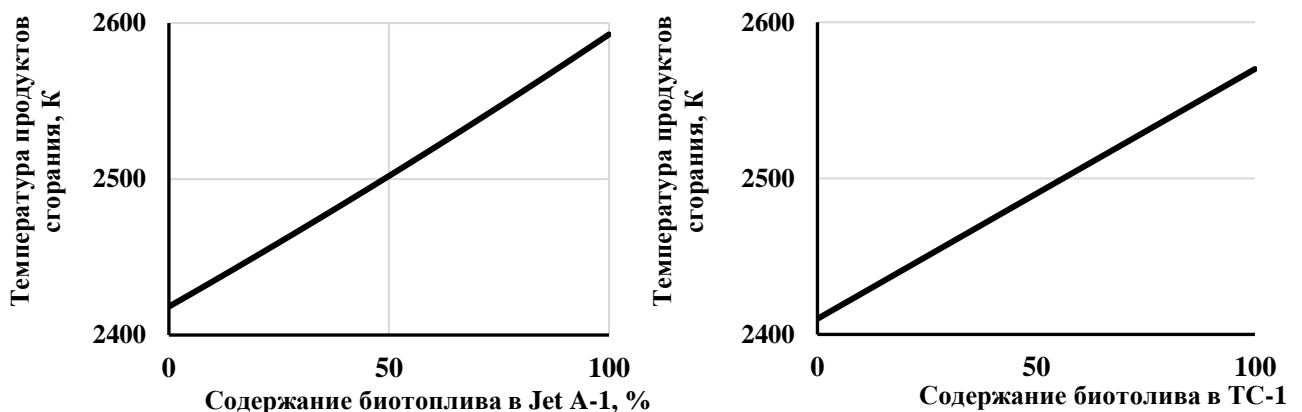


Рисунок 2.6 – Температура продуктов сгорания смеси топлива в зависимости от её состава

Процесс горения в газотурбинном двигателе на расчётных режимах осуществляется на бедных смесях. В тоже время на взлетном режиме ВС и при запуске ГТД процесс горения в газотурбинном двигателе осуществляется на богатой смеси. Изменение состава смеси приводит к изменению состава продуктов сгорания, т.е. обеспечению полноты окисления применяемой топливовоздушной смеси. Изменение состава смеси приводит и к изменению температуры продуктов сгорания, которую можно рассчитать по формуле:

$$T_{\Gamma} = \frac{H_u}{C_{p_m} \cdot (1 + \alpha \cdot L_0)} \quad (2.8)$$

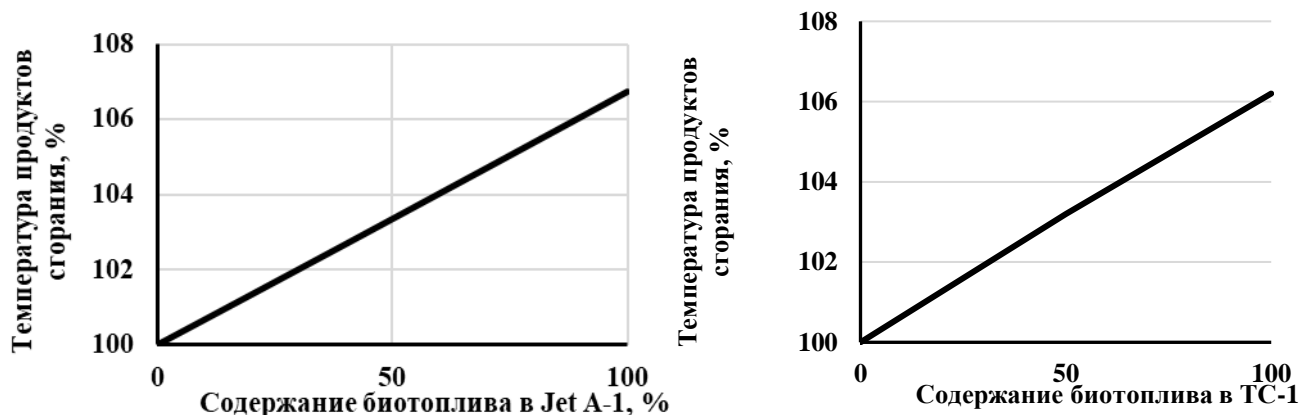


Рисунок 2.7 – Температура продуктов сгорания смеси топлива в зависимости от её состава

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 α 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 α , результаты которой представлены на рисунке 2.8.

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.

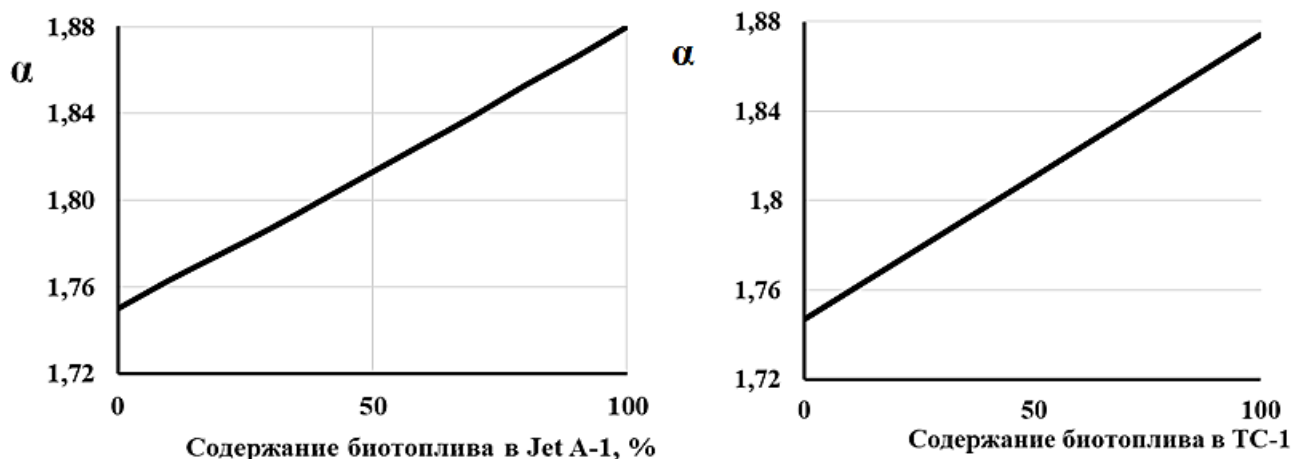


Рисунок 2.8 – Потребное значение коэффициента α в зависимости от состава смеси топлива для обеспечения оптимальной температуры продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания

Важной характеристикой топливовоздушных смесей для организации процесса горения в ГТД является ее вязкость. Она оказывает влияние на смазывающие способности топливовоздушной смеси и на прокачиваемость смеси по топливной системе, а также на распыл смеси форсунками в камере сгорания. Как было представлено выше биокеросин имеет более низкую вязкость по сравнению с традиционными керосинами. При добавлении биокеросина в нефтяные керосины их вязкость будет уменьшаться прямо пропорционально процентного соотношения биокеросина в смеси. Результаты представлены на рисунке 2.9.

Как видно 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.

Таким образом, проведенные в работе расчеты и анализ полученных результатов показывает, что добавление биокеросина в нефтяные керосины

приводит к изменению их физико-химических свойств. При этом ряд показателей улучшается, а ряд, наоборот, ухудшается. 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 СПК и керосинов Jet A-1 и ТС-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.

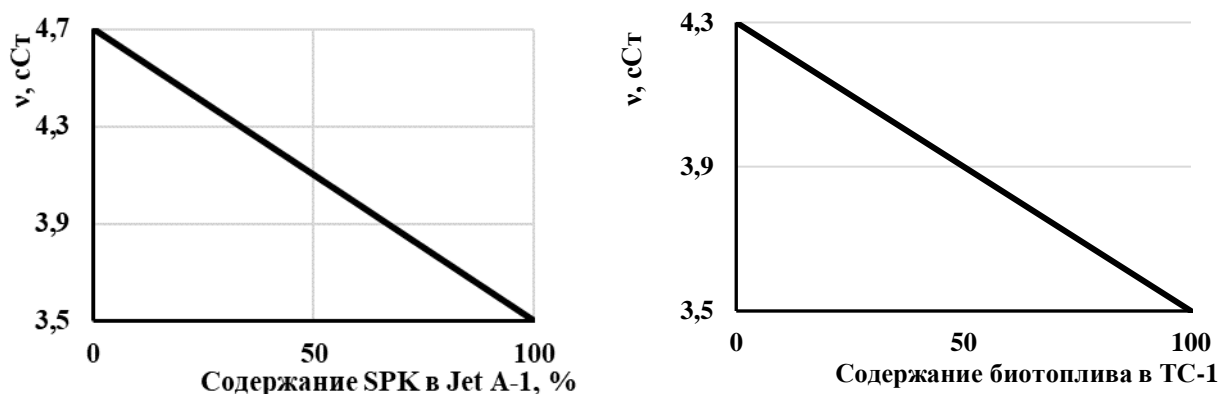


Рисунок 2.9 – Зависимость кинематической вязкости топливной смеси в зависимости от её состава

2.3. Оценка влияния применяемых топливных смесей на выбросы двигателя

Мировая гражданская авиация интенсивно осуществляет пассажироперевозки и грузоперевозки, объем которых возрастает примерно на 4...5% в год [14, 51]. Несмотря на то, что от деятельности авиации выбросы в окружающую среду составляют порядка 2% [54, 94] ИКАО призывает все страны мира к уменьшению выбросов на 50 % к 2050 году [71, 107]. Достижение такой задачи требует решения комплекса вопросов. Одним из таких вопросов 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. Основываясь на проведенном ранее сравнении физико-химических свойств, исследуемых композиций топливных смесей, и их составом, 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. Поэтому Конвенцией о международной гражданской авиации (ИКАО) [54] при сертификации газотурбинных двигателей параметры видов эмиссии таких как окись углерода (CO), количество несгоревших углеводородов (HC), окислов азота (NO_x) и дыма нормируется. Специалистами ИКАО был создан банк данных (EEDB – ICAO Engine Emission Bank) [106] об эмиссиях различных двигателей, прошедших сертификацию. В нем указаны значения EI (масса вещества, выделяющегося при сгорании единицы массы топлива) для NO_x, 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. В качестве примера приведем данные по выбросам для ряда двигателей (таблица 2.4).

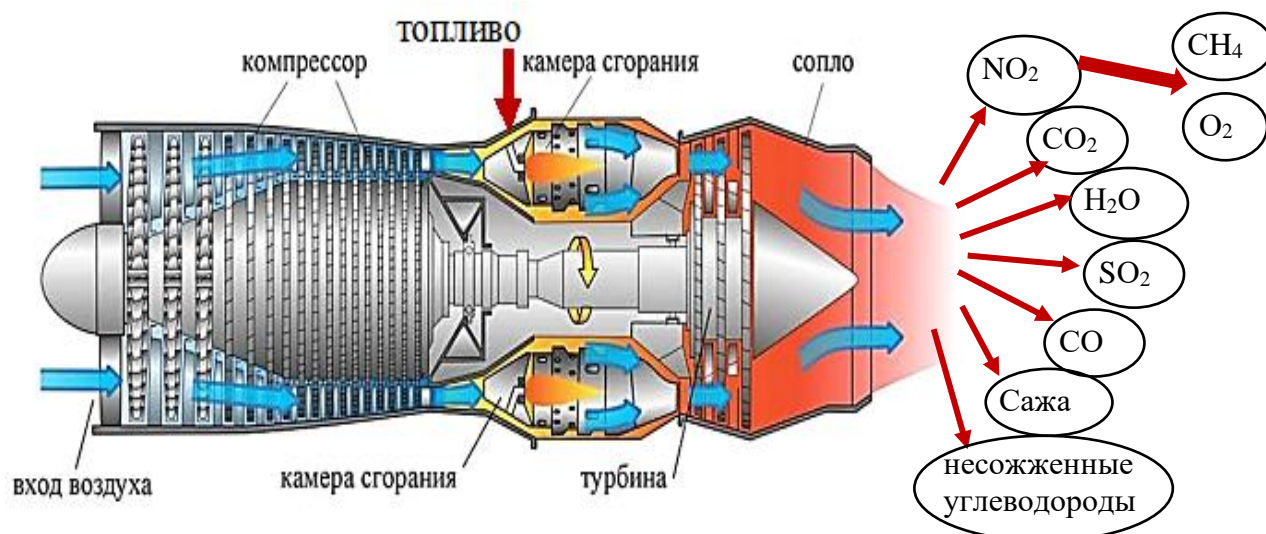


Рисунок 2.10 – Состав выбросов после сжигания топливовоздушной смеси в ГТД

Из таблицы 2.2 видно, что 100 % СПК биотопливо не содержит серы. В топливе ТС-1 ее содержание незначительно ниже в отличие от Jet A-1. Следовательно, при сжигании чистого биотоплива оксиды серы не будут образовываться. Добавление серы 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.

Таблица 2.4. Показатели выброса для двигателей [106]

Эксплуатационный режим	Мощность двигателя, %	Время, мин	Расход топлива, кг/с	Индексы эмиссии топлива, г/кг		
				HC	CO	NO _x
PW4074D						
Взлет	100	0,7	3,042	0,02	0,3	42,46
Набор высоты	85	2,2	2,471	0,02	0,35	32,71
Снижение	30	4,0	0,869	0,04	0,96	11,35

Малый газ	7	26,0	0,305	3,12	26,34	3,8
CFM56-5C3						
Взлет	100	0,7	1,373	0,008	0,98	34,7
Набор высоты	85	2,2	1,131	0,008	0,82	27,1
Снижение	30	4,0	0,370	0,074	1,57	10,4
Малый газ	7	26,0	0,1203	5,35	32,6	4,26
RB211-535C						
Взлет	100	0,7	1,80	0,25	0,7	33,71
Набор высоты	85	2,2	1,47	0,14	0,27	24,89
Снижение	30	4,0	0,54	0,44	0,48	6,37
Малый газ	7	26,0	0,20	1,44	18,79	3,44

Содержание ароматических углеводородов оказывает влияние на образование сажи и выбросов диоксида углеводорода 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 параметром как высота некопящего пламени у исследуемых топлив. Сажа является следствием несгоревшего топлива и приводит к образованию аэрозолей и увеличению облачности (конденсационных следов), которые могут существовать от нескольких минут до нескольких часов [58, 59].

Выбросы диоксида углеводорода CO_2 также напрямую зависят от содержания ароматических углеводородов в топливе. В работе был проведен расчет выбросов CO_2 для исследуемых смесей керосина с биотопливом. Учитывая, что в работе исследуются новые смеси, то для расчета выбросов 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 SO_2 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, CO_2 и вода являются единственными продуктами сгорания, а также выделяемая энергия. Тогда, чем выше теплотворная способность конкретного авиационного топлива, тем ниже количество CO_2 , образующегося для данной тяги, и тем ниже вклад топлива в эмиссию двигателя. Кроме того, чем выше отношение H/C , тем выше количество выделяющейся воды H_2O . Результаты расчета представлены в таблице 2.5.

Полученные автором индексы выбросов CO_2 коррелируются с данными, полученными авторами [88], полученными ими для керосина Jet A-1. Это согласуется с содержанием ароматических углеводородов в исследуемых топливных смесях (таблица 2.1), а также их теплотворной способностью и соотношением содержанием водорода к содержанию углерода в топливе.

Таблица 2.5. Результаты расчета индексов выбросов CO_2

Марка топлива	Индексы выбросов CO_2	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Соотношение водород / углерод
Jet A-1	3,167	43,1	0,159
ТС-1	3,161	43,2	0,163
100% SPK	3,10	43,8	0,181

50% SPK + 50% Jet A-1	3,13	43,6	0,176
50% SPK + 50% TC-1	3,127	43,6	0,172

Технический комитет Совета ИКАО (CAEP - Committee on Aviation Environmental Protection), рассматривающий вопросы защиты окружающей среды от применения гражданской авиации для применения эффективных технологий в процессе организации сжигания топлива при производстве ВС в 2016 распространил два новых стандарта по эмиссии CO₂ и нелетучих взвешенных частиц. Данные стандарты аналогичны существующим [53, 54], но с более высокими требованиями по CO₂. Стандарты будут применяться для находящихся в эксплуатации ВС с 2023 года и для новых – вводимых в эксплуатацию с 2020 года. В требованиях стандартов указано, что если находящиеся в эксплуатации ВС не будут отвечать требованиям по выбросам CO₂ и на них с помощью модернизации до 2028 года не устранят проблемы выбросов, то после 2028 года они не будут использоваться. За базовый уровень выбросов в стандартах технический комитет ИКАО предлагает установить эмиссию 2019...2020 годов. При несоответствии указанным уровням выбросов авиакомпании будут облагаться большими штрафами, которые пойдут на улучшение окружающей среды. Это не является новым подходом к решению проблемы выбросов вредных веществ и применялся в странах Евросоюза [118]. Так в 2014 году за превышение норм по выбросам ряду авиакомпаний, в том числе и Российским авиакомпаниям, со стороны Германии был выставлен штраф на сумму 2,7 млн евро [96].

По оценкам экспертов, применение биотоплива на ВС может привести к снижению вредных выбросов CO₂ примерно на 80 % в сравнении с применением в качестве топлива нефтяных авиакеросинов [7]. Начиная с 2007 г. было выполнено более 1500 рейсов с использованием биотоплива [7].

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.

Выводы по главе 2

1. Установлено, что добавление биотоплива в традиционные керосины уменьшает плотность и кинематическую вязкость такой смеси, что приводит к снижению энерговооружённости ВС и дальности его полёта с одной стороны, но положительно влияет на тонкость ее распыла в камере сгорания ГТД и прокачиваемость топливной смеси через топливную аппаратуру. При снижении вязкости смеси ниже критического значения (примерно менее 1,3 сСт) снижаются смазывающие свойства такой смеси, так как большинство биотоплив имеют низкие смазывающие способности. Изменение плотности зависит от температуры, поэтому применение 100 % биотоплива может привести к сокращению дальности полёта примерно на 10 %.

2. Установлено, что увеличение содержания биотоплива в традиционных керосинах уменьшает соотношение С/Н в такой смеси, что для организации процесса горения потребует увеличения потребного расхода газа через двигатель, а значит, приведет к увеличению его размеров и массы, что нежелательно. Увеличение содержания биотоплива в традиционном керосине (свыше 7 %) приводит к увеличению температуры продуктов сгорания такой смеси, а, следовательно, к увеличению коэффициента избытка воздуха.

3. На основании проведенного в работе сравнительного анализа показателей

свойств биотоплив и традиционных керосинов и их смесей, а также проведенных в работе расчетов установлено, что наиболее целесообразно применять в качестве авиатоплива на ВС смесь SPK и Jet A-1 в соотношении 1:1, что позволяет обеспечить наиболее приемлемые эксплуатационные показатели такой смеси и не требует изменения существующей инфраструктуры авиатопливообеспечения и внесения изменений в конструкцию функциональных систем ВС и АД.

4. Проведен расчет индексов выбросов CO₂ при применении на ВС биотоплива и его смеси с керосином.

3 Разработка модели оценки применения смесей биотоплива и керосина при эксплуатации авиационных двигателей

3.1 Математическая модель оценки эксплуатационно-технических характеристик ГТД при их эксплуатации на смеси биотоплива и керосина

В современных условиях на различных этапах жизненного цикла авиационной техники применяют математическое моделирование. Такой подход позволяет значительным образом сократить количество экспериментальных работ, трудозатрат, время на его проектирование и оценить получение возможных эксплуатационных характеристик. Немаловажным фактором в этих условиях является сокращение и экономических затрат.

При применении математических моделей и разработке новых моделей к ним предъявляются требования [74]. С целью дальнейшего применения или разработки новой модели по оценке влияния применяемых топлив на характеристики ГТД отметим основные требования к таким моделям:

1. Универсальность применяемой модели, состоящая в способности модели отображать всю полноту моделируемого объекта, т.е. может модель описывать работу авиационных двигателей различных схем или только какой-то конкретной схемы двигателя.

2. Адекватность модели, состоящая в способности отображать заданные свойства объекта с погрешностью, не выше заданной. Адекватность модели зависит от уровня понимания физического процесса, протекающего в моделируемом объекте и возможностью его математически описать.

3. Точность модели состоит в степени совпадения значений, полученных математическим расчетом с параметрами реального объекта, и зависит от методов решения и аппаратных средств.

4. Экономичность модели определяется затратами вычислительных ресурсов (машинного времени, памяти) и объемами исходной и выходной информации.

Зачастую требования, предъявляемые к разрабатываемым математическим моделям, имеют двойственность. Например, требование увеличения степени адекватности разрабатываемой модели приводит к снижению экономичности предлагаемой модели и т.д. Поэтому при выборе или разработке модели необходимо сочетать в ней выполнение поставленной задачи с заданными требованиями и затраченными на ее выполнение ресурсами.

Основная задача математического моделирования ГТД – это расчет его эксплуатационных характеристик, то есть определение тяги и удельного расхода топлива в заданных условиях полета (H и M_H) 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. Эти параметры могут быть получены экспериментально или путем газодинамического расчета двигателя, который включается в состав математической модели в качестве самостоятельного модуля, или известны заранее. В данной работе при разработке математической модели оценки эксплуатационных характеристик ГТД при его эксплуатации на биотопливе принимаем, что расчетные параметры двигателя нам известны. Проведем оценку влияния свойств (теплота сгорания, содержание водорода и т.д.) применяемых топлив на эксплуатационные характеристики двигателя и в первую очередь тягу и удельный расход топлива.

Непрерывное возрастание потребление энергоресурсов вызывает вопрос о диверсификации ресурсов нефти, из которой производится основная доля топлив, на другие (уголь, природный газ, биомассу) виды сырья сегодня

приходится только незначительная часть. Анализ тенденции развития авиатоплив [4, 15, 22, 37, 66, 67, 112] свидетельствует, что интенсивно ведутся работы по получению авиатоплив из других источников сырья и особенно биотоплива, получаемого из биотоплива в особенности из восстанавливаемых источников – водорослей. Одновременный и прямой переход использования биотоплива в ВС ГА является сложным и требует решения как технических, так и экономических задач. При использовании биотоплива таким вопросом является его влияние на служебные характеристики ГТД. Это связано с имеющимися отличиями служебных свойств биотоплив и их смесей от традиционных керосинов [22]. Проведение испытаний с различными видами топлива требует трудозатрат, времени и экономических ресурсов. Поэтому целесообразно с помощью адекватного применения математического моделирования провести объективную и быструю оценку влияния различных видов топлив, при их использовании в ГТД, на основные характеристики двигателя – дроссельную и высотно-скоростные характеристики.

Как было сказано выше, будем считать, что параметры двигателя нам известны. Рассмотрим математическую модель, которая бы учитывала основные служебные свойства применяемого топлива, с учетом сложных химических процессов в химмотологической системе смеси биотоплива и керосина. Не маловажным вопросом в этом случае является снижение вредных выбросов от применяемых авиатоплив.

Требования снижения воздействия авиации на окружающую среду в виде уменьшения выбросов в процессе ее применения выдвигает требование повышения топливной эффективности воздушных судов. Изменение схем планера ВС, применяемых ГТД приводит к некоторому повышению топливной эффективности, но приближается к своему максимальному пределу. Становится ясно, радикально улучшить характеристики топливной эффективности и снизить выбросы CO_2 без использования альтернативных видов топлива невозможно⁴.

⁴ ICAO Secretariat. Alternative Fuels. Potential Effects of Alternative Fuels on Local and Global Aviation Emissions // ICAO Environmental Report - 2007. Montreal (Canada): 2007.

Однако альтернативные виды топлива, как показывают исследования [15, 115] имеют отличительные физико-химические свойствами от традиционного авиационного керосина, что также не позволяет перейти на прямое применение биотоплива в ГТД. Однако многие мировые авиакомпании ведут исследования по возможному применению альтернативных видов топлива в ГТД [4, 73].

Как видно, разработка математической модели по оценке влияния служебных свойств применяемого топлива на высотно-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 заданием управляющих факторов. Считается, что в рассматриваемой ниже схеме ТРД (рисунок 3.1) 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 .

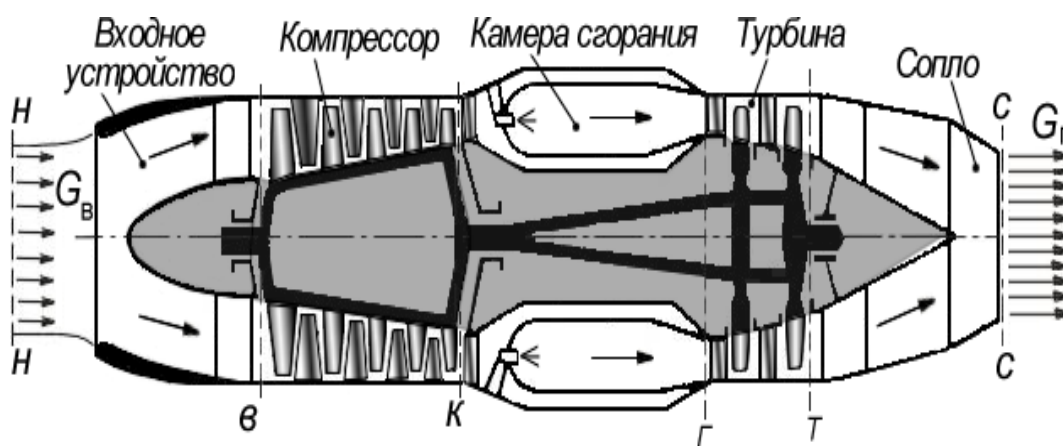


Рисунок 3.1 – Схема турбореактивного двигателя

В диссертационной работе в качестве управляемого параметра выбрана физическая частота вращения ротора n . В процессе моделирования будут меняться только параметры рабочего тела – авиатоплива.

В настоящее время разрабатываются и проходят различные стадии исследования и испытаний многие марки биотоплива. Для проведения математических расчетов и влияния биотоплива и его смеси с керосином необходимо знать их параметры.

Поэтому исходя из возможности и зная параметры топливных смесей проедем с помощью математической модели оценку их влияния на служебные характеристики ГТД. Для этого в работе в качестве рабочего тела были выбраны следующие топливные смеси, представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Исходные данные для математической модели видов топлив

№ п/п	Марка топлива	H_u , кДж/кг	η_r	k_r	g_r	$c_{п}$, 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

В главе 2 был проведен сравнительный анализ свойств представленных топлив и их смесей.

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...1,33. Газовая постоянная для воздуха принимается равной $R = 287,05$ Дж/(кг·К), а для газа - $R_g = 287,6$ Дж/(кг·К).

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

$$k = \frac{(1+1,5 \cdot 10^{-3} T^*)}{(0,672+1,2 \cdot 10^{-3} T^*)} \quad (3.1),$$

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

Для вычисления k_g существует аналогичное выражение:

$$k_g = \frac{(1+1,5 \cdot 10^{-3} T^*)}{(0,672+1,2 \cdot 10^{-3} T^*)} - 0,7g_T + 1,1g_T^2 \quad (3.2),$$

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

$$g_T = \frac{c_{п}(T_g^* - T_k^*)}{\eta_r H_u} \quad (3.3),$$

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:

$$c_{п} = 0,883 + 2,09 \cdot 10^{-4} (T_g^* + 0,48 \cdot T_k^*) \quad (3.4)$$

Газовую постоянную можно вычислить по следующей приближенной формуле:

$$R_g = 287,05 + 24,5g_T \quad (3.5)$$

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

$$m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (3.6)$$

Все представленные в работе формулы, за исключением (3.3) и (3.6) являются полуэмпирическими, достоверность которых проверялась для широкого класса задач.

Таким образом, 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;
- η_r – коэффициент выделения тепла (полнота сгорания);
- $c_{п}$ – условная теплоемкость процесса подвода теплоты при горении керосина в воздухе, кДж/(кг•К);
- k_r - показатель адиабаты;
- g_T – относительный расход топлива в камере сгорания.

Выбранные варьируемые параметры для каждой марки топлива или топливной смеси представлены в таблице 3.1.

Известно [36, 48], что для применения топлива на ВС в основном определяют 12 основных показателей авиационных топлив. Нужно отметить, что методы их определения в РФ и за рубежом отличаются. Кроме того, отличаются и условия проведения эксперимента для их определения. В этих условиях зачастую сложно провести объективное сравнение. Однако на ВС применяются топлива, имеющие уже характеристики не зависимо от того каким методом, их определили. Проведём их анализ (таблица 3.1). 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 оказывает влияние на высотно-скоростную и дроссельную характеристики ГТД.

Проведем расчет тяги и удельного расхода топлива ГТД от условий полета и режима работы двигателя с учетом применения различных топлив.

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_g^* [89]. Как было отмечено ранее программу регулирования ГТД не будем менять, а только вводим данные служебных свойств выбранных для исследования авиатоплив (таблица 3.1).

Результаты полученных расчетов математического моделирования зависимостей тяги и удельного расхода топлива от исследуемых сортов топлива или смеси биотоплива с керосином представлены на рисунках 3.2 и 3.3.

Проведем анализ полученных зависимостей (рисунок 3.2 и 3.3). 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 [18]. 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 (рисунок 3.2 и 3.3).

При анализе характера изменения удельного расхода топлива (рисунок 3.3) 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.

Из рисунка 3.3 видно, что 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.

Таким образом целесообразно провести анализ результатов математического моделирования с различными видами топлива на этих высотах. Из полученных результатов (рисунок 3.2 и 3.3) 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.

В главе 2 был проведен сравнительный анализ характеристик биотоплив и керосина и сделан вывод, что они находятся в приемлемых для эксплуатации диапазонах. Полученные расчеты подтверждают, что эффективность работы ГТД зависит от физико-химических свойств применяемых топлив (таблица 3.2) [22, 36, 48].

Таким образом, 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.

Таблица 3.2. Основные показатели свойств традиционных керосинов и биотоплив

Характеристики топлива	ТС-1	Jet A-1	50 % FT SPK в Jet A-1	50 % FT SPK в ТС-1	17 % HDO SAK в HEFA SPK
объемная теплота сгорания, МДж/м ³ x 10 ³	33,9	35,1	34,3	33,1	33,8
низшая теплота сгорания, МДж/кг	43,2	43,1	43,6	43,5	43,6
содержание углерода, %	86,0	86,1	85,0	85,2	85,54
содержание водорода, %	14,0	13,7	15,0	15,5	14,43
отношение водород / углерод	0,16	0,16	0,18	0,18	0,17

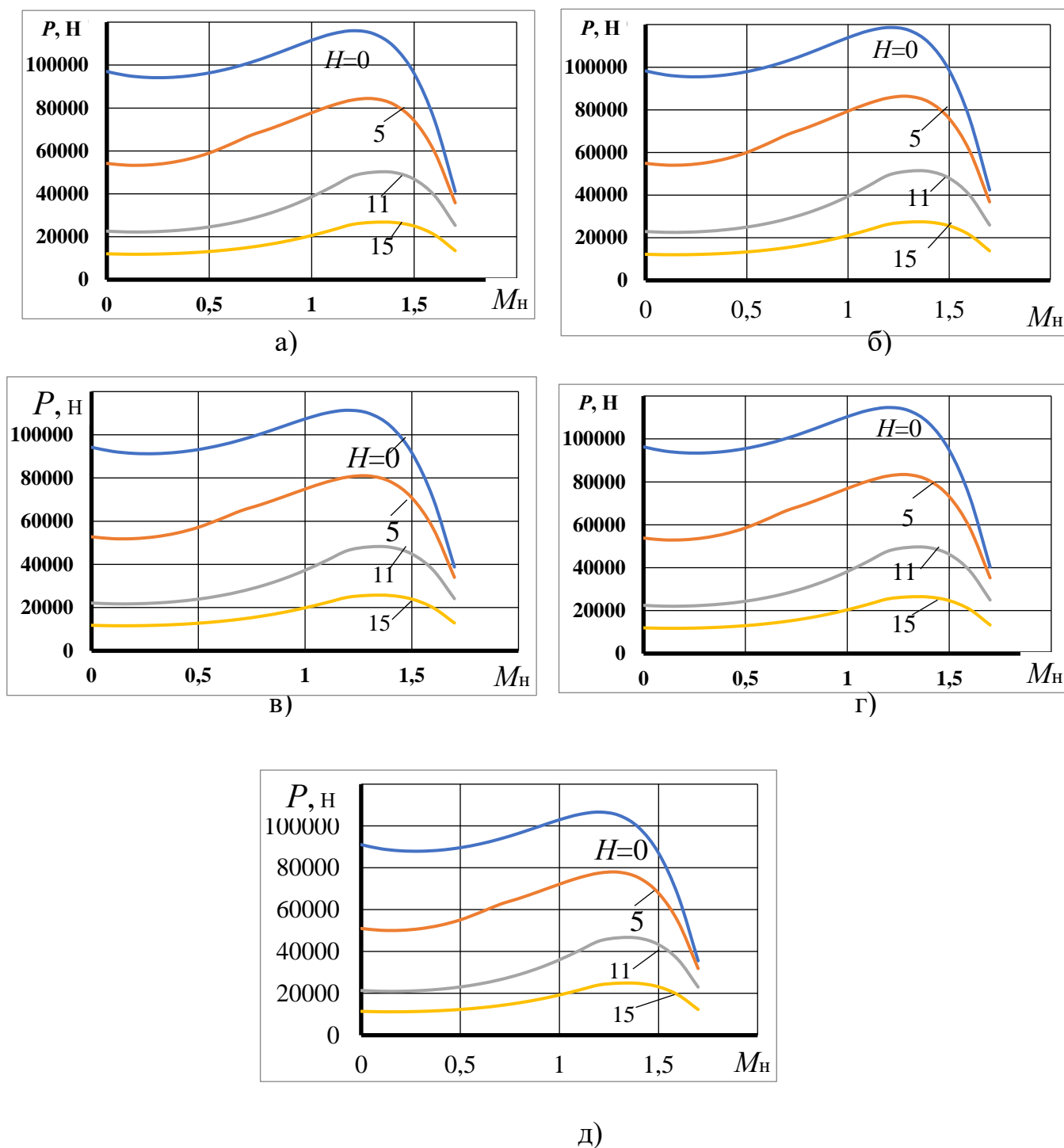


Рисунок 3.2 – Зависимость тяги двигателя от скорости полета на разной высоте при применении авиатоплив: а) – TC-1; б) - JetA1; в) - 17 % HDO SAK в HEFA SPK; г) - 50 % FT SPK в Jet A-1; д) - 50 % FT SPK в TC-1

Из полученных результатов видно, что при использовании смеси биотоплива и керосина Jet A-1 можно улучшить характеристики ГТД. Этот вывод подтверждается и сравнительным анализом физико-химических свойств смеси

биотоплива и керосина в сравнении с чистым биотопливом или керосином. Отличие в химическом составе исследуемых смесей приводит к изменению термодинамического процесса горения топливовоздушной смеси в камере сгорания ГТД, а значит и к изменению характеристик ГТТ и выбросов после сгорания такой смеси.

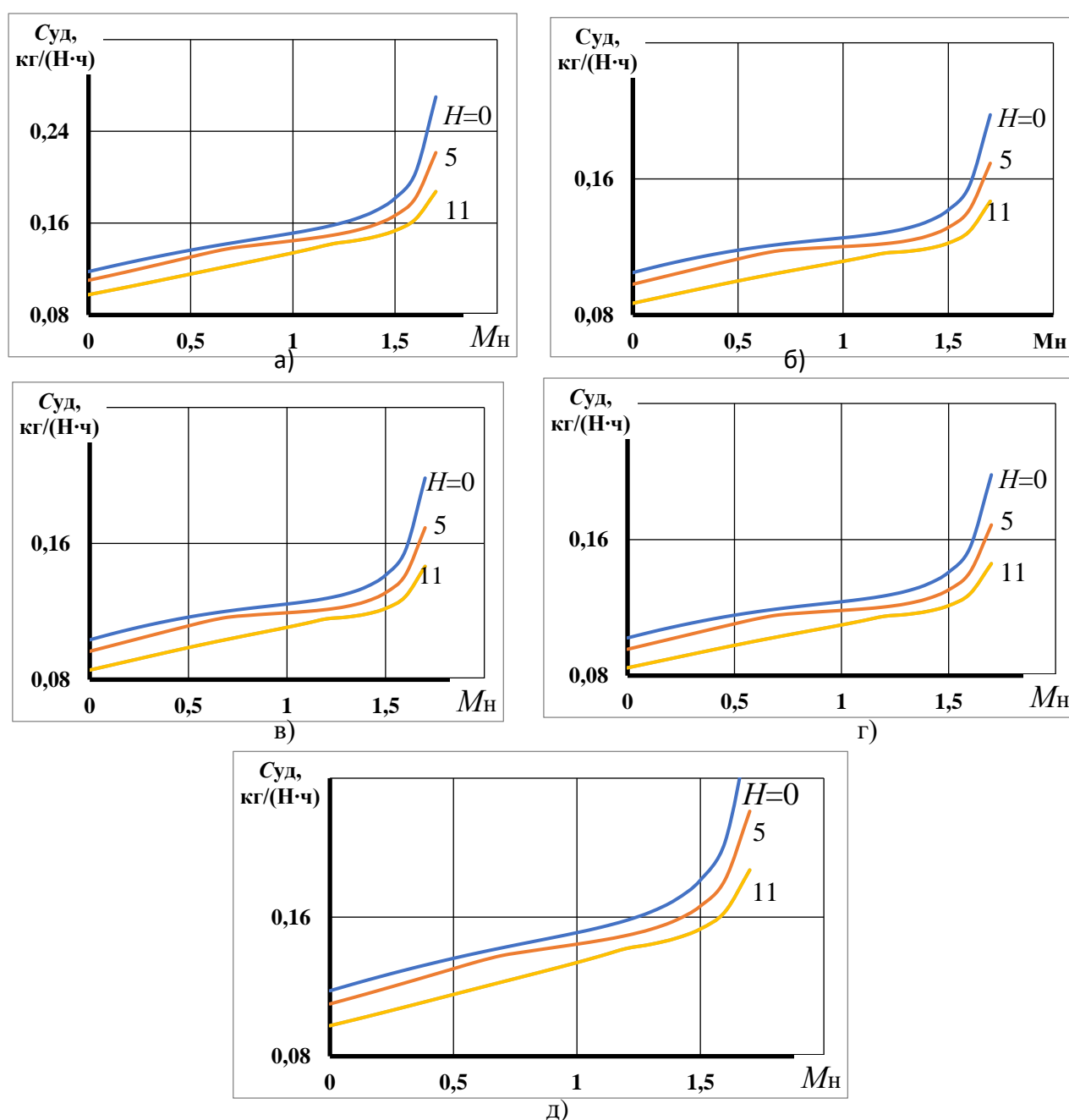


Рисунок 3.3 – Зависимость удельного расхода топлива от скорости полета на разной высоте при применении авиатоплив: а) – ТС-1; б) - JetA1; в) - 17 % HDO SAK в HEFA SPK; г) - 50 % FT SPK в Jet A-1; д) – 50 % FT SPK в ТС-1

3.2 Экспериментальная оценка эффективности применения смеси биотоплива и керосина

Эффективность использования ВС гражданской авиации зависит не только от технического совершенства его планера и двигателя, но и от применяемого топлива. Все большее использование биотоплива в гражданской авиации выдвигает новые требования к конструктивным особенностям разрабатываемых газотурбинных двигателей, что является многокомпонентной задачей.

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.

Поэтому 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 (рисунок 3.4). 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.

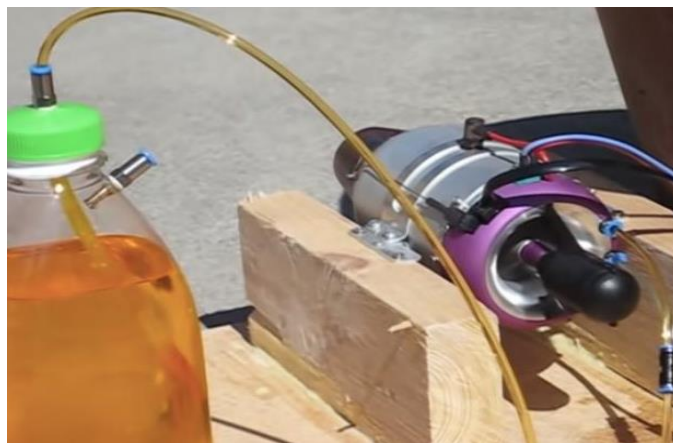


Рисунок 3.4 – Внешний вид двигателя Jetcat P300 Pro для испытания с различными видами топлива

Проведем анализ полученных результатов каждого из исследуемых параметров.

В первую очередь проведем сравнение удельного расхода топлива для каждого из видов топлива, так как он оказывает влияние на получаемую тягу двигателя и определяет эффективность применения топлива как с точки зрения выбросов, так и цены топлива. Результаты замеров сведены в таблице 3.3 и представлены на рисунках 3.5 и 3.6.

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. Как было ранее отмечено (глава 2) 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.

Таблица 3.3. 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

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

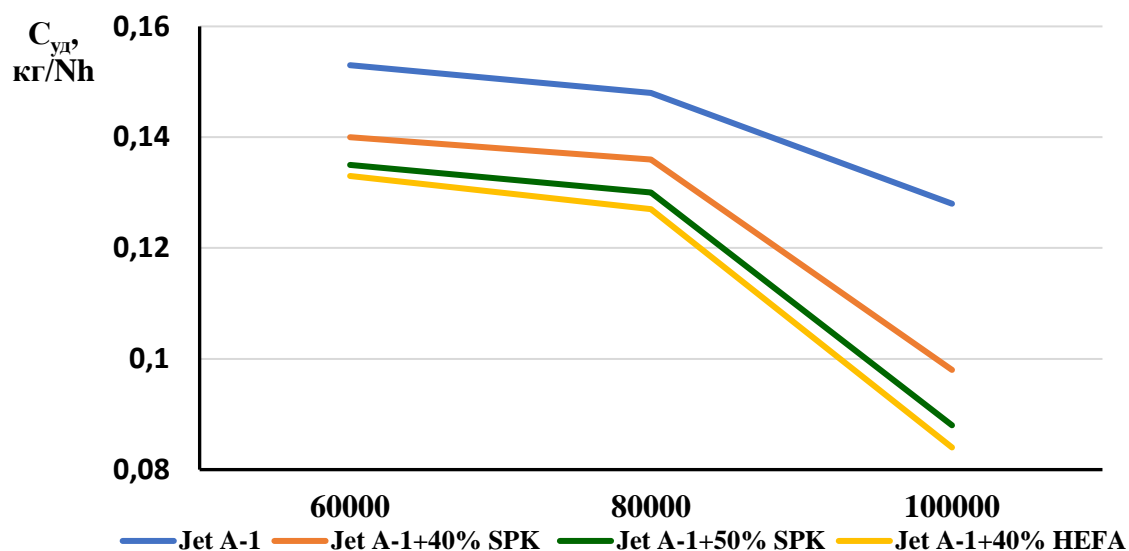


Рисунок 3.5 – Изменение расхода топлива различных топливных смесей с изменением оборотов двигателя

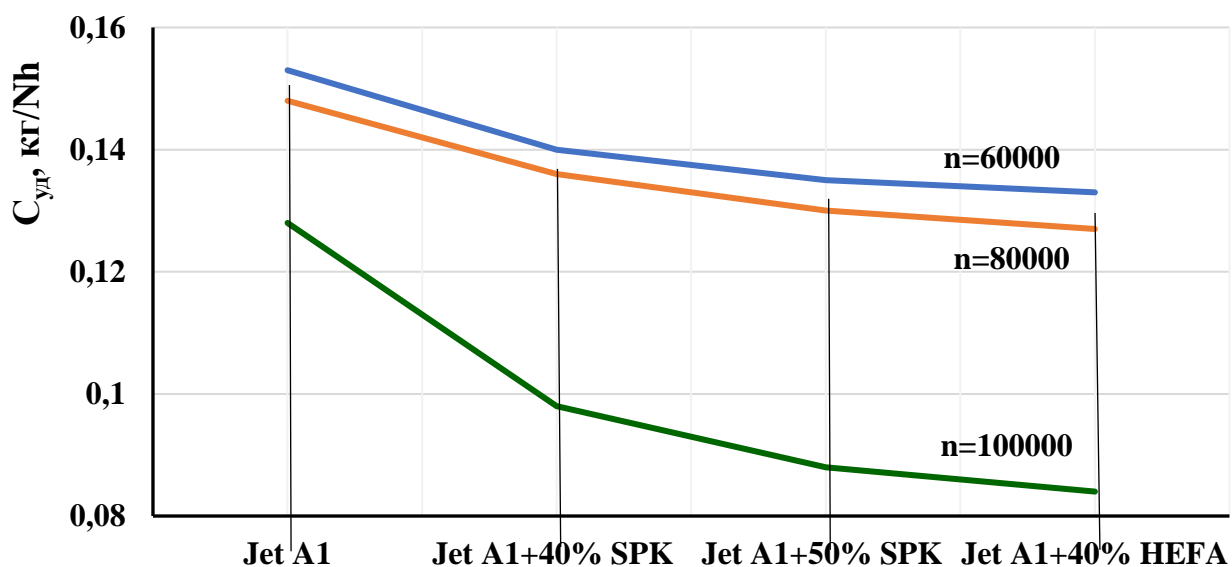


Рисунок 3.6 – Изменение расхода топлива различных топливных смесей с при заданных оборотах двигателя

Важнейшей характеристикой ГТД является его тяга. При проведении эксперимента был произведен замер получаемой тяги двигателя при работе на различных видах топлива с изменением его оборотов (таблица 3.4 и рисунок 3.7 и 3.8).

Таблица 3.4. Зависимость тяги двигателя от применяемого топлива

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

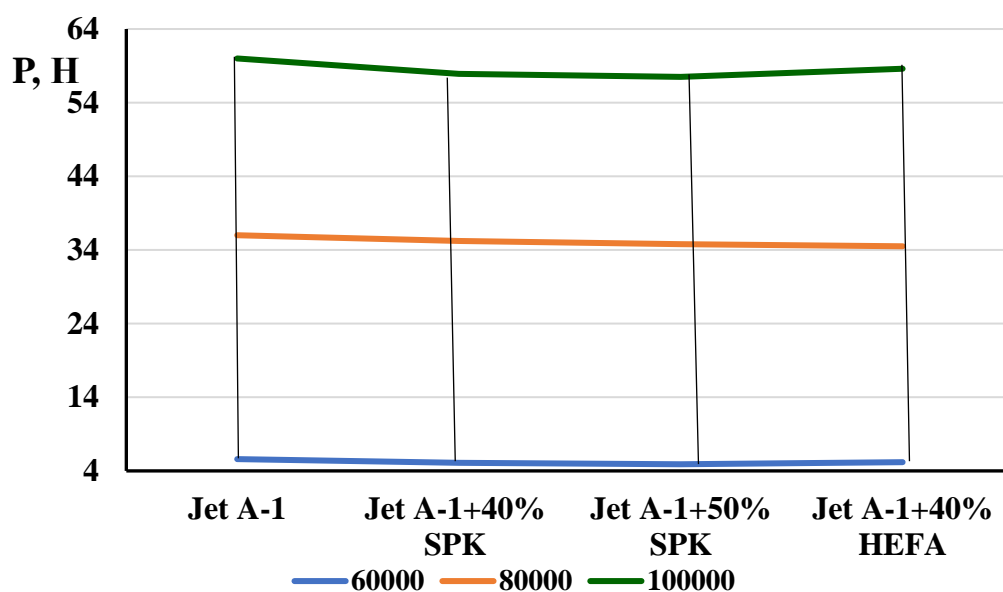


Рисунок 3.7 – Зависимость изменения тяги двигателя от его оборотов при сжигании различных видов топлива

Результаты таблицы 3.4 и рисунков 3.7 и 3.8 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 (рисунок 3.7). На малых оборотах двигателя его тяга при сжигании всех видов топлива мало отличается (рисунок 3.7). 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

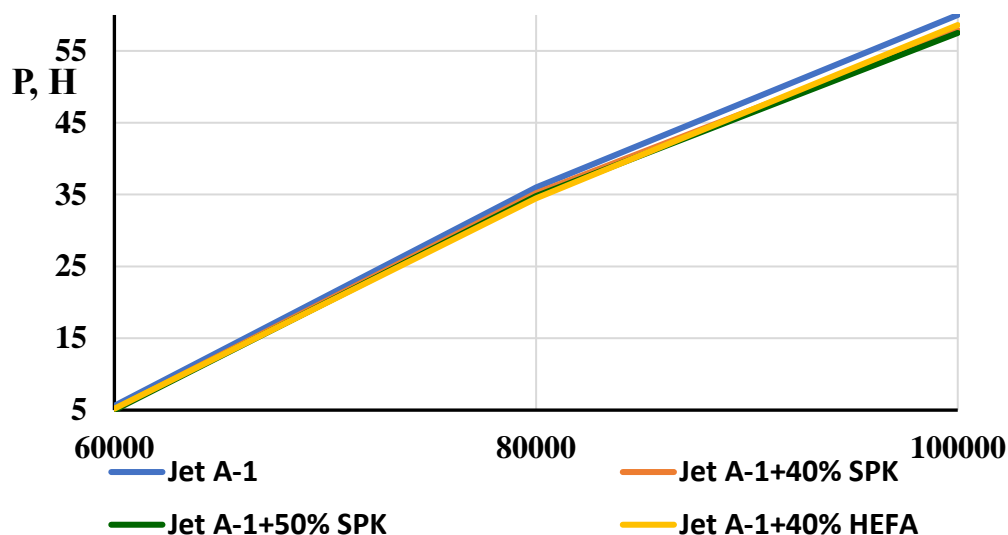


Рисунок 3.8 – Зависимость изменения тяги двигателя при сжигании исследуемых видов топлива на различных его оборотах

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

Результаты проведенного эксперимента показали, что при применении биотоплива тяга двигателя по сравнению с использованием чистого керосина Jet A-1 уменьшается на 3...5 % в зависимости от процентного соотношения биотоплива в керосине, а удельный расход топлива уменьшается на 25...30%, что говорит о более высокой топливной эффективности такой топливной смеси. Кроме того, это является косвенным подтверждением меньшего количества вредных выбросов.

Еще одним важным параметром работы ГТД является температура газа после турбины. Она оказывает влияние на получаемую тягу двигателя. При исследовании проводили замер температуры выходных газов при работе двигателя на различных видах топлива. Результаты эксперимента сведены в таблицу 3.5 и представлены на рисунке 3.9.

Таблица 3.5. Зависимость температуры продуктов сгорания от применяемого топлива

Параметр	Jet A-1	Jet A-1+40% SPK	Jet A-1+50% SPK	Jet A-1+40% HEFA
$T_r, ^\circ\text{C}$, при $n=37000$ об/мин	550	545	543	546
$T_r, ^\circ\text{C}$, при $n=80000$ об/мин	488	472	468	475
$T_r, ^\circ\text{C}$, при $n=100000$ об/мин	580	565	560	568

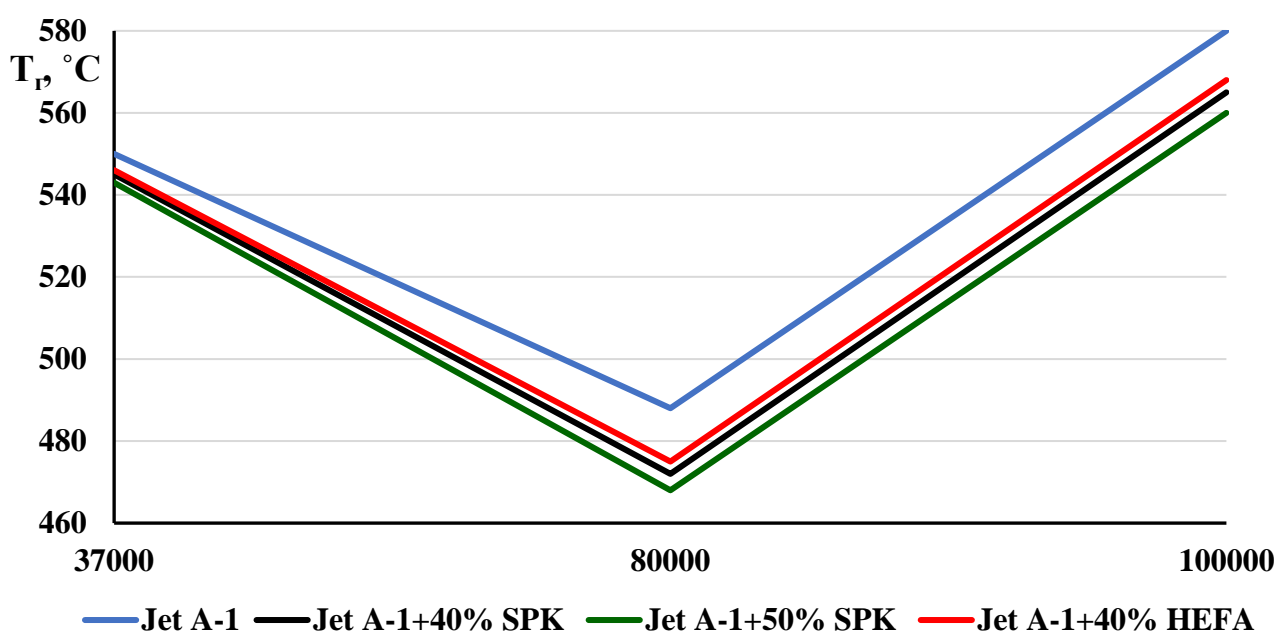


Рисунок 3.9 – Зависимость изменения температуры газа после турбины двигателя от его оборотов при сжигании различных видов топлива

Как видно из результатов эксперимента наибольшая температура выхлопных газов достигается при сжигании нефтяного керосина. С увеличением оборотов температура выхлопных газов увеличивается, однако разность температур при сжигании керосина и биотоплива не значительна. Это подтверждает и некоторое уменьшение тяги при использовании биотоплива или его смеси с керосином. С увеличением процентного содержания биотоплива температура выхлопных газов уменьшается.

Таким образом 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 с получаемой тягой на чистом керосине, а удельный расход наоборот – на 25...30 % лучше по отношению с керосином Jet A-1. 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 о адекватности предложенной в работе математической модели расчета высотной и дроссельно-скоростной характеристик ГТД.

3.3 Техничко-экономическая оценка применяемых смесей биотоплива и керосина

Для применения на ВС того или иного вида топлива требуется проведение сравнительного анализа не только его физико-химических свойств, влияния на характеристики двигателя, но и технико-экономической эффективности его применения. Выше (см. глава 2) в работе проведены сравнения свойств нефтяных керосинов и их смесей с биотопливом по основным параметрам. Это позволяет производить выбор топлива по физико-химическим свойствам, а предложенная

математическая модель оценки высотно-скоростной и дроссельных характеристик ГТД по полученным параметрам.

Проведем сравнительную оценку исследуемых топливных смесей с точки зрения их стоимости для осуществления заправки на один полет и количества выбросов CO₂ в процессе сжигания в ГТД.

Как было ранее рассчитано и подтверждено экспериментально 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 уменьшение вредных выбросов от сжигания такого топлива. Эти два обстоятельства косвенно влияют и на количество вредных выбросов.

Проведем расчет выбросов CO₂ исследуемых топливных смесей. Известно [88, 110], что выбросы от топлив, произведенных из биомасс, принимаются как нуль, так как растения способны поглощать из атмосферы выбросы CO₂, образовавшихся во время горения, что может быть компенсировано воздействием на окружающую среду. То есть жизненный цикл выбросов CO₂ от биомасс будет менее продолжительным, чем жизненный цикл CO₂ от нефтяных керосинов. Выбросы оцениваются индексом выбросом и исследователями [88, 110] получена формула для расчета CO₂ за цикл полета:

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

Результаты расчетов сведены в таблице 3.6.

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 3.6).

Немаловажным фактором при использовании любого топлива на ВС является его стоимость. Конечно, любое вновь разрабатываемое топливо будет иметь в начальный период его применения высокую цену. Стоимость топлив из возобновляемых источников сырья сегодня превышают стоимость керосина примерно вдвое [17]. Для примерных расчетов стоимости полной заправки ВС типа А-330 и А-320 от стоимости топливоздушную смеси нефтяного керосина и биокеросина СПК 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 (рисунок 3.10).

Таблица 3.6. Результаты расчетов индекса выбросов от применяемого топлива

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

Видно, что с увеличением содержания биокеросина СПК 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 СПК 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. Как утверждают эксперты [101, 102, 109, 119] применение биотоплива в ГА в перспективе может обеспечить сокращение вредных выбросов CO_2 до 70...80 %.

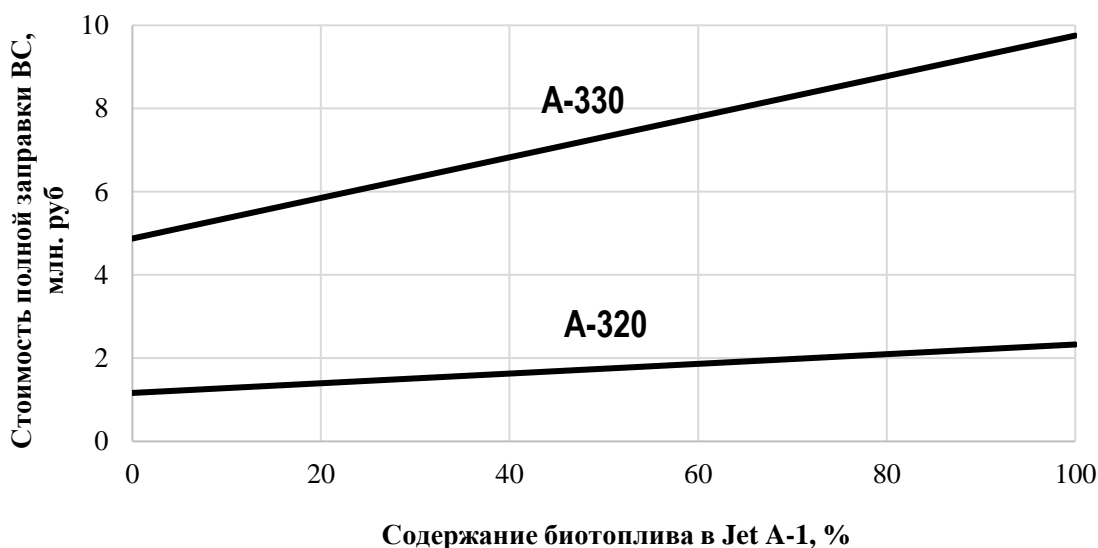


Рисунок 3.10 – Зависимость стоимости полной заправки ВС от состава смеси топлива

Таким образом, 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 CO_2 , CH_4 и NO_x в процессе сжигания керосина. Для оценки полного цикла требуется оценить способность растений поглощать выбросы, что является достаточно сложной задачей.

Жизненный цикл биотоплива по технологии Фишера-Тропша состоит из следующих этапов: производство синтез-газа; синтез Фишера-Тропша; гидрокрекинг. Перед проведением синтеза Фишера-Тропша синтез-газ очищают, что приводит к тому, что окончательно готовое биотопливо не содержит загрязнений в виде серы и азота. Это приводит к тому, что в процессе сжигания биотоплива образуется низкое содержание CO_2 , т.е. меньше выбросов. Кроме того, длина углеродной цепи в биотопливе регулируется гидрокрекингом, следовательно, получаемое биотопливо не зависит от исходного сырья, в отличие от керосина, а зависит от параметров процесса обработки.

Следует отметить, что энергоэффективность переработки сырой нефти оценивается примерно в 90%, в то время как эффективность получения биотоплива сегодня оценивается в 45...55%. Однако развитие технологий и спрос на биотопливо приведут к повышению эффективности процесса производства биотоплива. Использование водорослей в качестве сырья объясняется их высокими темпами роста, а также водоросли не являются конкурентными для производства продуктов питания. Не маловажно, что остатки водорослей в процессе производства биотоплива образуют метан, который можно использовать как в самом процессе производства биотоплива, так и для внешнего производства электроэнергии. Это также повышает эффективность процесса производства биотоплива из водорослей. Сегодня рассматривается вопрос кормления водорослей с дополнительным CO_2 от применения электричества в процессе их производства, что также приведет к повышению эффективности всего жизненного цикла.

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

Выводы по главе 3

1. Установлено, что изменение процентного соотношения биотоплива и керосина влияет на взлетно-скоростную и дроссельную характеристики ГТД.

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

3. Проведен расчет дроссельной и высотно-скоростной характеристик ГТД, получаемых при применении смеси биотоплива с традиционными керосинами в различных пропорциях.

4. Достоверность полученных результатов математического моделирования согласуется с результатами получаемых дроссельной и высотно-скоростной характеристик ГТД при применении массово используемых марок керосинов Jet A-1 и ТС-1.

5. Установлено, что применение смеси биотоплива и керосина Jet A-1 позволяет получить более высокие характеристики ГТД.

6. 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.

7. Установлено, что при использовании смеси биотоплива и керосина тяга двигателя может уменьшаться на 3...5 % с увеличением пропорции биотоплива

в керосине по отношению с получаемой тягой на чистом керосине, а удельный расход наоборот – на 25...30 % лучше по отношению с керосином Jet A-1.

8. Установлено, что 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 о адекватности предложенной в работе математической модели расчета высотной и дроссельно-скоростной характеристик ГТД.

9. Проведенная 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.

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 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 нежелательно, 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 с получаемой тягой на чистом керосине, а удельный расход, наоборот – на 25...30 % снижается по отношению с керосином 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 сокращений и условных обозначений

- АСКТ – авиационное сконденсированное топливо
- БПЛА – беспилотный летательный аппарат
- ВС – воздушное судно
- ГА – гражданская авиация
- ГПЗ – газоперерабатывающий завод
- ГСМ – горюче-смазочные материалы
- ГТД – газотурбинный двигатель
- ИАТА – международная ассоциация воздушного транспорта;
- ИКАО – международная организация гражданской авиации —
(International Civil Aviation Organization);
- МЭА - международное энергетическое агентство;
- НПЗ – нефтеперерабатывающий завод
- СПГ - сжиженный природный газ
- ШФЛУ – широкая фракция легких углеводородов
- EASA - Европейское агентство по безопасности авиаперевозок
- HEFA – биотопливо полученное гидрированием сложных эфиров и жирных кислот (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)
- HDO-SAK – гидродезоксигенированный синтезированный ароматический керосин
- HVO – биотопливо полученное гидроочистки масел (Hydrotreated Vegetable Oil)
- SPK – синтетический парафиновый керосин

Список литературных источников

1. **Авиапорт** “Авиация нуждается в альтернативных видах топлива”
<http://www.aviaport.ru/news/2012/07/27/238185.html>
2. **Авиационные** происшествия, инциденты и авиакатастрофы в СССР и России [Электронный ресурс]: airdisaster.ru, 2006–2012. — Режим доступа: <http://www.airdisaster.ru>
3. **Александров, Н.** История ядерного самолёта в кратком изложении // Двигатель. - 2003. - № 6 (30). - 2004. - № 7 (31)
4. **Альтернативные** виды авиационного топлива // Материалы совещания по международной авиации и изменению климата. Документ ИКАО HLM-ENV/09-WP/9. – Монреаль, 10/08/09. 19.
5. **Анализ** качества горючего. Методическое пособие. /Под ред. В. В. Каука. – М.: Изд-во ОАО ИПК «Ульяновский Дом печати», 2008 – 696 с.
6. **Аналитический** отчет. Основные тенденции развития рынка биотоплива в мире и России за период 2000-2012 годов. Корпорация Развитие
7. **Артур Нургалеев.** Биотопливо нуждается в государственной поддержке [Электронный ресурс] – Опубликовано: 01.02.2012. – Режим доступа: <https://www.aviaport.ru/news/2012/02/01/228946.html> (дата обращения: 15.03.2019).
8. **Бакулин, В.Н.** Газовые топлива и их компоненты. / В. Н. Бакулин, Е. М. Брещенко, Н. Ф. Дубовкин, О. Н. Фаворский— М.: МЭИ, 2009. 614 с.
9. **Бащенко Н. С.** Возможности получения нового авиационного топлива – АСКТ / Н. С. Бащенко, А. Ю. Аджиев, О. Г. Шей. – М.: Экспозиция нефть и газ. – 2009. – № 5. С. 40-41.
10. **Бойченко, С. В.** Моторные топлива и масла для современной техники. / С. В. Бойченко, С. В. Иванов, В.Г. Бурлака— К.: НАУ, 2005. — 216 с.

11. **Братков, А. А.** Химмотология ракетных и реактивных топлив / А. А. Братков, Е. П. Серегин и др. – М.: Химия, 1987. - 304 с.
12. **Братухин, А. Г.** Оценка эффективности пассажирских самолетов на сжиженном природном газе / А. Г. Братухин, Л. С. Яновский, В. В. Разносчиков и др. — М.: Авиационная промышленность. — 2010. — № 1. — С. 8–16
13. **Бурмистров, О. А.** Результаты исследований качества образца авиационного синтетического жидкого топлива / Бурмистров, О. А., Малышев Д.А., Серета А.В. и др./ В сб. Трудов ЦИАМ «Проблемы ПВРД и химмотологии». – М.: ЦИАМ, 2010, - 125с.
14. **Бюллетень** о текущих тенденциях российской экономики. 43 ноябрь 2018. 20 С. Объем международных пассажирских авиаперевозок превысил докризисный уровень [Электронный ресурс] / Электронный деловой журнал «Экономические известия»: eizvestia.com, 2007—2012. — Режим доступа: <http://world.eizvestia.com/full/>. — 26.06.2012.
15. **Васильев, А. Ю.** Особенности применения биотопливной смеси в камерах сгорания современных газотурбинных двигателях / А. Ю. Васильев, О. Г. Челябин, Р. С. Медведев / Вестник СГАУ. 2013. № 3(41). С. 57-62.
16. **Воздействие** авиационного транспорта на окружающую среду [Электронный ресурс]. URL: https://otherreferats.allbest.ru/ecology/00771234_0.html.
17. **Возобновляемое** топливо: биокеросин для авиакомпаний. avianews.com, 22 ноября 2016 года
18. **Гишваров, А. С.** Эксплуатационная надежность топливных систем воздушных судов [Учебное пособие] / А. С. Гишваров. – Уфа: УГАТУ, 2008. – 298 с.
19. **Глаголева, О. Ф.** Топлива для двигателей внутреннего сгорания и альтернативная энергетика / О. Ф. Глаголева, Т. Н. Белоконь // Тезисы докладов Межведомственной научно-технической конференции «55 лет химмотологии. Основные итоги и направления развития». – 2019. с. 49.
20. **Государственная** программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы», утвержденная

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2012 года № 2509-р. - М.: Минпромторг России, 2012. - 512 с.

21. Грядунов, К. И, Маслова Т. М. Химмотология и контроль качества ГСМ. Авиационные топлива [Учебно-методическое пособие] / К. И. Грядунов, Т. М. Маслова. – М.: ООО «МИР», 2019. – 56 с.

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

23. ГОСТ 10227-2013. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2014, 34 с.

24. ГОСТ 32595-2013. Топливо авиационное для газотурбинных двигателей Джет А-1 (JET А-1). Технические условия. М.: Стандартиформ, 2014, 19 с.

25. Дамская, И.А. Методика определения новых составов альтернативных топлив / И.А. Дамская, В.В. Разносчиков / – М.: Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 5. С. 72-80

26. Даффи Пол, Кандалов Андрей. А.Н. Туполев – человек и его самолеты. — М.: «Московский рабочий» 1999, 137 с.

27. Денисова, Е. В. Система топливопитания двигателя и ее влияние на работу автоматики с учетом физико-механических свойств различных топлив. /Денисова Е.В., Черникова М.А. – М.: Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова Том 11 (2016), № 1, с. 107–111

28. Дмитриев, В. Г. Экологические проблемы гражданской авиации / В. Г. Дмитриев, А. Г. Мунин // – М.: Аэрокосмический курьер. 2003. № 2. С. 15-17

29. Дубовкин, Н. Ф. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив / Н. Ф. Дубовкин, В. Г. Маланичева, Ю. П. Массур, Е. П. Федоров. – М.: Химия, 1985. – 240 с.

30. Зайцев, В. П. К вопросу об эффективности внедрения авиационного сконденсированного топлива. — М.: Наука и технологии, № 3 (7) / 2013, с. 38...43

31. **Законы** горения [Текст] / под общ. ред. Ю.В. Полежаева. - М.: Энергомаш, 2006 - 352 с.
32. **Инструктивный** материал по сборам за авиационную эмиссию, связанную с местным качеством воздуха. Док. 9884. – ИКАО, 1 издание, 2007.
33. **Итоги** мероприятий ИКАО по альтернативным видам топлива. Рабочий документ CAEP/8-WP/59. - Монреаль: ИКАО, 2010.
34. **Карапетов, А.Э.** Основные принципы процесса сжигания биотоплива / А.Э. Карапетов/ – М.: Журнал "Новости теплоснабжения" №11 (171), 2014 г. С 25...32
35. **Кириакиди, С. К.** Надежность летательных аппаратов: Учеб. пособие/ С. К. Кириакиди, В. А. Сатин и др. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2009. 107 с.
36. **Коняев, Е. А.** Эксплуатационные свойства авиационных горюче-смазочных материалов [Учебное пособие] / Е. А. Коняев, К. И. Грядуннов. – М.: МГТУ ГА, 2016. – 82 с.
37. **Конференция** по авиации и альтернативным видам топлива. Мехико, Мексика, 11–13 октября 2017 года, CAAF/2-WP/20, 7 С.,
38. **Краснопольский, Б. Х.** Энергетика России. Проблемы и перспективы. – М: Наука, 2006. – 27 с.
39. **Кривошеин, А. Н.** Производство биотоплива в Европейском Союзе: политика, сертификация, критерии устойчивости / А. Н. Кривошеин; под общ. ред. Н. М. Шматкова, WWF России и А. И. Воропаева, Ассоциация экологически ответственных лесопромышленников России. — М.: 2016 — 39 [1] с.
40. **Кузьменко, С.** Перспектива – топливные элементы? / С. Кузьменко, И. Бикеева / – М.: Авиаглобус. - 2008. - № 12 (116)
41. **Кульчицкий, А.Р.** Топлива для энергоустановок. Расчет термодимических показателей: учеб. пособие / А.Р. Кульчицкий; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009 – 100 с

42. Литвинов, А. А. Основы применения горюче-смазочных материалов в гражданской авиации [учеб. для вузов] / А. А. Литвинов. – М.: Транспорт, 1987. – 308 с.

43. Малолетнев, А. С. Современное состояние технологий получения жидкого топлива из углей /А. С. Малолетнев, М. Я. Шпирт. – М.: Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2008, т. LII, № 6, с 44...52

44. Ми-8ТГ. Авиация мира. <http://www.brazd.ru/av/mi-8tg.html>? С. К. Постоев, В. П. Зайцев “Современное состояние и возможности перевода вертолетов и самолетов региональной авиации на авиационное сконденсированное топливо - АСКТ”. — М.: Сборник научных трудов ГосНИИ ГА, № 311, 2010

45. Миягашева, В. А. Экологические проблемы в авиации и пути их решения. /В. А. Миягашева, Д. Р. Иншаков, А. В. Пономарёв, О. Г. Бойко / II Международная научно-практическая конференция, посвященная Дню космонавтики «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» – 2016. Том 1 с. 808...810.

46. Мордкович, В. З. Четыре поколения технологии получения синтетического жидкого топлива на основе синтеза Фишера – Тропша/ Исторический обзор /В. З. Мордкович, Л. В. Синева, Е. В. Кульчаковская, Е. Ю. Асалиева/ – М.: Катализ в нефтеперерабатывающей промышленности № 5, 2015, с. 23...45

47. Наставление по службе горюче-смазочных материалов на воздушном транспорте Российской Федерации (НГСМ – РФ – 94): утв. зам. министра ГА 1 ноября 1991г.

48. Нечаев, В. М. Горюче-смазочные материалы и специальные жидкости. Учебное пособие. / В. М. Нечаев, Ф. И. Ткачев. – Санкт-Петербург, 2015, 60 С.

49. Николайкин, Н. И. Перевод на альтернативные виды топлива как способ повышения энергетической и экологической эффективности транспорта

/ Н. И. Николайкин, Б. Н. Мельников, Ю. А. Большунов / Научный Вестник МГТУ ГА. – 2010. – № 162. С. 12-21

50. **Нынешние** и будущие тенденции в области авиационного шума и эмиссии авиационных двигателей. Рабочий документ А37-WP/26. — Монреаль: ИКАО, 2010. — 10 с.

51. **Объем** международных пассажирских перевозок превысил докризисный уровень [Электронный ресурс] /Электронный деловой журнал «Экономические известия»: eizvestia.com/full/. – Режим доступа: <http://world.eizvestia.com/full/>. – 26.06.12.

52. **Огурцов, М. Г.** Глобальное потепление – вопросы без ответов // Солнечно-земная физика: сб. науч. тр. / РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т солнечно-земной физики. – Новосибирск: СО РАН, 2008. – Вып. 12 (125). – Т. 2. – С. 295–296

53. **Охрана** окружающей среды. Том 1 Авиационный шум: Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, Издание 3, июль 2008 г.

54. **Охрана** окружающей среды. Том 2. Эмиссия авиационных двигателей: Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, Издание 5, июль 2014 г. Сопровождение комитета ИКАО по охране окружающей среды от воздействия авиации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/novosti-novosti/?id=2412> (дата обращения: 30.03.2016)

55. **Отчет** о деятельности инициативной группы по Устойчивой Авиации Среднего Запада США (MASBI). [Электронный ресурс]. URL: http://www.masbi.org/content/assets/MASBI_Report.pdf.

56. **Панцхава, Е.** Биоэнергетика. Мир и Россия. Биогаз. Теория и практика. Монография/ Е. Панцхава. – М.: 2014, Издательство: Русайнс, 972с

57. **Пискунов, В. А.** Химмотология в гражданской авиации / В. А. Пискунов, В. Н. Зрелов, В. Т. Василенко и др. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.

58. **Поповичева, О. Б.** Авиационные сажевые аэрозоли: физико-химические свойства и последствия эмиссии в атмосферу // О. Б. Поповичева, А. М. Старик – М.: Известия РАН. ФАО. 2007. Т 43, № 2. С. 147-164.

59. Поповичева, О. Б. Сажевые аэрозоли в верхней тропосфере: свойства и последствия эмиссии авиации / О. Б. Поповичева, Н. М. Персианцева, Н. А. Зубарева, Н. К. Шония, А. М. Старик, А. М. Савельев. – М.: НИИЯФ МГУ, 2005, 83 с.

60. Прогноз общемирового спроса на биотопливо — Abercard [Электронный ресурс] // Исследовательская компания www.abercade.ru, 1999–2017. URL: <http://www.abercade.ru/research/analysis/8991.html>.

61. Разносчиков, В. В. Анализ использования криогенных и газовых топлив в силовых установках магистральных самолетов. / В. В. Разносчиков, А. И. Чепанов / Научный вестник МГТУ ГА. – М.: Изд. МГТУ ГА. №134, 2008, С. 10–15

62. Разносчиков, В. В. Оптимизация состава авиационного сконденсированного топлива для транспортных самолетов. / В. В. Разносчиков, М. Л. Яновская / — М.: АвтоГазоЗаправочный Комплекс плюс. Альтернативное топливо, № 4(52). 2010. С. 11–15.

63. Ратнер, С. В. Инновации в авиастроении: анализ результатов исследовательских программ по разработке альтернативных видов авиационного топлива // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 492 – 506. <https://doi.org/10.24891/ni.14.3.492>

64. Резников, М. Е. Химия и авиационные горючие и смазочные материалы. / М. Е. Резников, Г. К. Старостенко — Харьков: Издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1977. — 300 с.

65. Руководство по приему, хранению, подготовке к выдаче на заправку и контролю качества авиационных горюче-смазочных материалов и специальных жидкостей в предприятиях Российской Федерации: приказ ДВТ от 17 октября 1992г. № ДВ-126

66. Рыбкин, С. А. Перспективы использования биотоплива в гражданской авиации. /С. А. Рыбкин, С. А. Попова. – М.: Научный вестник МГТУ ГА, № 214, 2015, С. 114...118.

67. Саргсян, Д. Р. Анализ опыта применения альтернативных топлив на воздушных судах/ Д. Р. Саргсян / — М.: Научный вестник МГТУ ГА № 174, 2011, с. 91...95

- 68. Сердюк В. В.** Альтернативные топлива, преимущества и недостатки / В. В. Сердюк, Л. А. Ашкинази / IV Междунар. практ. конф. «Новые топлива с присадками». Сообщение 4. Газообразные топлива. – С. 15
- 69. Серёгин Е. П.** Развитие химмотологии. / Е. П. Серегин. – М.: Первый том, 2018. – 880 с
- 70. Силуянова, М. В.** Применение альтернативных топлив в авиационных газотурбинных двигателях. /М. В. Силуянова, О. Г. Челебян / — М.: Труды МАИ. Выпуск № 87.
- 71. Совещание** комитета ИКАО по охране окружающей среды от воздействия авиации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/novosti-novosti/?id=2412> (дата обращения: 30.03.2016)
- 72. Сорохтин, О. Г.** Парниковый эффект: миф и реальность / О. Г. Сорохтин / – М.: Вестн. РАЕН. – 2001. – Т. 1, № 1. – С. 6–21.
- 73. Федоров, Е. П.** Разработка синтетического реактивного топлива из биосырья // Прямоточные ВРД и химмотология. / Е. П. Федоров, Н. А. Французова и др. /Труды ЦИАМ. — 2010. — № 1340. — С. 107–116
- 74. Федченко, И. А.** Аналитический отчет. Основные тенденции развития рынка биотоплива в мире и России за 2000-2012 годы. / И. А. Федченко, А. С. Соловцова, А. Н. Лукьянов / - ОАО Корпорация развитие 2013 http://portal-energo.ru/files/articles/portal-energo_ru_2.pdf С.44.
- 75. Хакимзянов, Г. С.** Математическое моделирование: В 2 ч.: Учеб. пособие Ч. 1: Общие принципы математического моделирования. / Г. С. Хакимзянов, Л. Б. Чубаров, П. В. Воронина. – Новосибирск, Новосиб. гос. ун-т., 2010 148 с.
- 76. Хворенкова, А. Ж.** Теория горения и взрыва: сб. задач /А. Ж. Хворенкова. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014 – 80 с.
- 77. Химические вещества** из угля. Пер. с нем./ Под ред. Ю. Фальбе – М: Химия, 1980. – 616 с.

78. Хоруженко, Е. С. Развитие рынка биотоплива в мире [Текст] / Е. С. Хоруженко, В. К. Дорогов / Инновационная экономика: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2017 г.). — Казань: Бук, 2017. — С. 27-31.

79. Цвигун, И. В. Мировой рынок сжиженного природного газа: современная конъюнктура и тенденции развития / И. В. Цвигун, Е. В. Ершова // Известия Байкальского государственного университета. — 2016. — Т. 26, № 6. — С. 868–881. — DOI: 10.17150/2500-2759.2016.26(6).868-881

80. Яковлева, А. В. Влияние качества авиационных топлив на безопасность полета и окружающую среду. / А. В. Яковлева, С. В. Бойченко, О. А. Вовк / Институт экологической безопасности Национального авиационного университета. – Киев, Наука та інновації. 2013. Т. 9. № 4. С. 25—30.

81. Яновский, Л. С. Альтернативные реактивные топлива: проблемы и перспективы/ Л. С. Яновский, Е. П. Федоров, Н. И. Варламова, П. В. Бородако, И. М. Попов. – Киев.: Вісник НАУ. 2009. №1, с. 108...112

82. Яновский, Л.С. Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей. / Л. С. Яновский, Н. Ф. Дубовкин, Ф. М. Галимов [и др.]. — Казань: Мастер Лайн, 2002. — 400 с

83. Яновский, Л. С. Основы авиационной химмотологии. / Л. С. Яновский, Н. Ф. Дубровкин, В. П. Дмитренко. — М.: МАТИ, 2005. — 680 с.

84. Airbus, Flying by Numbers. Global Market Forecast. Airbus Industry. Toulouse, France. 2015.

85. ASTM D4054 – 09, Standard practice for qualification and approval of new aviation turbine fuels and fuel additives, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009

86. ASTM D 7566-09. Стандарт на топливо для авиационных газотурбинных двигателей, содержащее синтезированные углеводороды. С. 18.

87. ASTM D1655. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, 11b

88. Aspen Tech Inc., Hysys 2004.2: Simulation Basis. Cambridge (USA): Aspen Technology, Inc.; 2005

89. Ardeshiri S. The impact of physico-chemical properties of the jet fuel and biofuels on the characteristics of gas-turbine engines. – М.: Научный вестник МГТУ ГА, том 22, №06, 2019, С 8...16.

90. Arthur H. Lefebvre and Dilip R. Ballal. Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions. https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf. / Материалы совещания по международной авиации и изменению климата. Документ ИКАО HLM-ENV/09-WP/9. – Монреаль, 10/08/09

91. Aviation Safety Network [Электронный ресурс] / Flight Safety Foundation: aviation-safety.net, 1996–2012. — Режим доступа: <http://aviation-safety.net/statistics/>

92. Boeing. World Air Cargo Forecast 2014–2015. Boeing Commercial Airplanes Marketing. Seattle, WA, USA. 2014.

93. Boeing. Current Market Outlook 2016–2035. Boeing Commercial Airplanes Market Analysis. Seattle, WA, USA. 2016.

94. Boichenko S. Prospects of biofuels introduction into aviation // Transport engineering and management / Boichenko S. Yakovleva A./ Proceedings of the 15-th conference for Lithuania Junior researchers. Science — future of Lithuania, 4 May 2012. — Vilnius: Technika. — 2012. — P. 90—94.

95. Doc 10012, CAEP/9. Комитет по охране окружающей среды от воздействия авиации девятое совещание. Монреаль 4 5 февраля 13 года

96. EU states tread warily on naming and shaming aircraft operators that have failed to comply with EU ETS rules. <http://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=2021>

97. El-Galad MI. Economic feasibility study of biodiesel production by direct esterification of fatty acids from the oil and soap industrial sector. /El-Galad MI, El-Khatib KM, Zaher FA / - Egypt J Pet 2015; 455–460

98. Fu J., Yang C., Wu J., Zhuang J., Hou Z., Lu X. Direct production of aviation fuels from microalgae lipids in water // Fuel. – 2015. – Vol. 139. P. 678–683.

99. Glover, B. M. Boeing and the Environment: Our Commitment to a Better Future: Presentation of Boeing Management Company. – Seattle (USA): Boeing Management Company, 17.06.2008.

100. Goyal, H. B. BioFuels from Thermochemical Conversion of Renewable Resources: Review /H. B. Goyal, D. Seal and R. C. Saxena A/ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, No 2, 2008, pp. 504-517.

101. Hari T. K., Yaakob Z., Binitha N.N. Aviation Biofuels from Renewable Resources: Routs, Opportunities and Challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol. 42, pp. 1234–1244. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.095>

102. Hileman J.I., Wong H.M., Ortiz D., Brown N., Maurice L., Rumizen M. The Feasibility and Potential Environmental Benefits of Alternative Fuels for Commercial Aviation. Proc. 26th International Congress of the Aeronautical Sciences. ICAS, 2008

103. Hileman J.I., Wong H.M., Waitz I. Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels. — Santa Monica, California: RAND Corporation, 2009. — 120 p.,

104. International Energy Agency IEA, Oil information 2010, 2010

105. ICAO Secretariat. Alternative Fuels. Potential Effects of Alternative Fuels on Local and Global Aviation Emissions // ICAO Environmental Report - 2007 - Montreal (Canada): 2007.

106. ICAO Aircraft engine emission Databank. November 2016. <https://www.easa.europa.eu/documentlibrary/icao-aircraft-engine-emissionsdatabank>

107. Jong S. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. / Jong S, Antonissen K, Hoefnagels R, Lonza L, Wang M, Faaij A, et al. Biotechnol Biofuels 2017;10(64):1–18

108. Kinder, J., Rahmes, T., Evaluation of bio-derived synthetic paraffinic kerosene (Bio-SPK), The Boeing Company, Sustainable Biofuels Research &Technology Program, 2009.

109. Kousoulidou M., Lonza L. Biofuels in aviation: fuel demand and CO₂ emissions evolution in Europe toward 2030 // Transportation Research Part D:

Transport and Environment. 2016. Vol. 46. P. 166–181. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.018>

110. Meghdad S. Experimental and numerical studies for soot formation in laminar coflow diffusion flames of Jet A-1 and synthetic jet fuels. PhD thesis. University of Toronto; 2013

111. Santa Monica, California: RAND Corporation, 2009. — 120 p.,

112. Space Facts “Новый альтернативный источник топлива для самолетов” <http://spacefacts.ru/news/planet-earth/eco/725-novyuy-alternativnyy-istochnik-topliva-dlya-samoletov.html>

113. Schmidt M., Paul A., Cole M., Ploetner K.O. Challenges for ground operation arising from aircraft concepts using alternative energy // Journal of Air Transport Management. – 2016. – Vol. 56. – Part B. P. 107–117.

114. The EU Emission Trading System (EU ETS). – European Union, 2016

115. Wajid A. Chishty. Benchmarking data from the experience gained in engine performance and emissions testing on alternative fuels for aviation. / Wajid A. Chishty, Tak Chan, Pervez Canteenwalla, Craig R. Davison, Jennifer Chalmers / - This paper was originally presented at the 1st Global Power and Propulsion Forum in Zurich, J. Glob. Power Propuls. Soc. 2017, p 195–210. <https://doi.org/10.22261/S5WGLD>.

116. Williams R.H. A comparison of direct and indirect liquefaction technologies for making fluid fuels from coal / R.H. Williams, E.D. Larson // Energy for Sustainable Development. – 2003. – Vol. VII, No. 4. – P. 103-129

117. Winchester N., McConnachie D., Wollersheim C., Waitz I.A. Economic and Emission Impact of Renewable Fuel Goals for Aviation in the US. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013, vol. 58, pp. 116–128. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.001>