



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экологии и биоресурсов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
Дипломная работа

На тему: Возможности и перспективы снижения загрязнения
атмосферного воздуха при использовании новых видов топлива
в гражданской авиации

Исполнитель Пучков Артём Олегович

Руководитель кандидат биологических наук, доцент
Мандрыка Ольга Николаевна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

кандидат географических наук, доцент
Дроздов Владимир Владимирович

« ___ » _____ 20__ г.

Санкт–Петербург
2019

Оглавление

| | |
|--|----|
| Список использованных сокращений | 3 |
| Введение..... | 4 |
| Глава 1. Проблема загрязнения атмосферы воздушным транспортом..... | 6 |
| 1.1 Краткая история воздушного транспорта..... | 6 |
| 1.2 Общие сведения о загрязнении атмосферы воздушным транспортом | 7 |
| 1.3 Пути снижения выбросов загрязняющих веществ | 11 |
| Глава 2. Биотопливо как способ снижения эмиссии парниковых газов | 15 |
| 2.1 Поколения и виды биотоплива | 16 |
| 2.1.1 Первое поколение биотоплива | 17 |
| 2.1.2 Второе поколение биотоплива | 19 |
| 2.1.3 Третье поколение биотоплива | 24 |
| 2.1.4 Виды альтернативного биологического топлива | 27 |
| 2.2 Технологии производства биотоплива | 29 |
| 2.2.1 АТJ | 29 |
| 2.2.2 SIP | 31 |
| 2.2.3 F-T..... | 32 |
| 2.2.4 HEFA | 33 |
| 2.3 Требования к авиационному биотопливу..... | 33 |
| 2.4 Сертификация..... | 39 |
| Глава 3. Перспективы и последствия внедрения | 42 |
| 3.1 Экологический аспект | 42 |
| 3.2 Экономический аспект | 46 |
| Заключение | 50 |
| Список использованных источников | 52 |

Список использованных сокращений

ICAO – International Civil Aviation Organization, Международная организация гражданской авиации.

CORSIA – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, Схема компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации.

CAEP – Committee on Aviation Environmental Protection, Комитет ICAO по охране окружающей среды от воздействия авиации.

SAF – Sustainable Aviation Fuel, устойчивое авиационное топливо.

ASTM – American Society for Testing and Materials, Американское общество по испытаниям и материалам.

ATJ – Alcolgol-to-jet, процесс производства топлива из спирта.

SIP – Synthesized iso-paraffins, процесс синтеза изопарафинов.

F-T – Fisher–Tropsch synthesis, процесс Фишера-Тропша.

HEFA – Hydroprocessed esters and fatty acids, процесс производства топлива из эфиров и жирных кислот.

LCA – Life Cycle Assessment, оценка жизненного цикла.

Введение

Жизнь современного человека тесно связана с транспортом. Будучи наиболее молодым среди прочих видов, воздушный транспорт динамично развивается. В наше время гражданская авиация стала одним из факторов воздействия на окружающую среду, проявляющимся, главным образом, в эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу.

Ослабление такого влияния, а именно снижение выбросов в окружающую среду загрязняющих веществ, является актуальной задачей на сегодняшний день, ввиду чего актуальными являются и различные научные изыскания, посвящённые данной проблеме. Посвящена ей и данная работа.

Таким образом, целью работы является оценка возможности и перспектив снижения загрязнения атмосферного воздуха воздушным транспортом путём использования новых видов топлива, в частности, биотоплива.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Ознакомиться с историей воздушного транспорта и путями снижения загрязнения им атмосферы.
2. Рассмотреть различные виды биотоплива и технологию их производства.
3. Охарактеризовать мировые требования к биотопливу, а также механизмы его сертификации.
4. Проанализировать экологические и экономические последствия массового применения биотоплива.

На сегодняшний день публикации, обобщающие различную информацию о производстве и применении биотоплива в глобальном масштабе, в русскоязычной научной среде отсутствуют. Кроме того, на данный момент в мире не существует единой схемы перевода авиации на данный вид альтернативного топлива, как и окончательных качественных и количественных характеристик самого биотоплива.

Новизна работы состоит в обобщении имеющейся в иностранных научных источниках информации касательно производства биотоплива, а также выявлении последствий его применения.

В настоящее время на территории Российской Федерации не производится и не применяется биотопливо, ввиду чего привлечение внимания к данной проблеме является важным с точки зрения улучшения качества окружающей среды.

Материалами для выполнения работы служили статистические данные международных организаций, законодательные акты и государственные стандарты Российской Федерации, международные стандарты, научные работы и публикации.

Автором данной работы были самостоятельно проанализированы и обработаны статистические данные, построена GIS-модель распределения выбросов загрязняющих веществ гражданской авиацией по странам мира, обобщена различная информация о процессе производства биотоплива, а также показаны возможные последствия массового внедрения такого альтернативного вида топлива.

На защиту выпускной квалификационной работы были вынесены следующие положения:

1. Эмиссия в атмосферу загрязняющих веществ растёт.
2. Вопросы снижения выбросов требуют изучения.
3. Переход на биотопливо является путём решения проблемы.

Глава 1. Проблема загрязнения атмосферы воздушным транспортом

1.1 Краткая история воздушного транспорта

Воздушный транспорт – самый молодой из доступных ныне широким общественным массам видов транспорта.

Первыми управляемыми воздушными транспортными средствами, способными перемещать относительно большое число пассажиров на большие расстояния, стали дирижабли. «Золотой век» этих наполненных гелием воздушных судов пришёлся на эпоху между двумя Мировыми войнами – на 20-е и 30-е годы XX века.

К сожалению, такое экстравагантное средство передвижения утратило своё значение в конце 30-х годов XX века.

Закат эпохи дирижаблей утвердил нового гегемона в царстве воздушного транспорта – самолёт. Так, в середине 30-х годов XX века началось массовое производство дореактивных воздушных транспортных средств.

В 50-е годы началась эра уже реактивных авиалайнеров. Пионерами в этой области стали британская фирма «De Havilland Comet» и американская компания «Boeing».

Первый полёт реактивной транспортной авиации был совершён 15 июля 1954 года самолётом Boeing 707, вскоре своё слово сказал Советский Союз, осуществивший 17 июля 1955 года полёт Ту-104.

В 1958 году количество пассажиров, перевезенных через Атлантический океан авиацией, впервые превысило количество пассажиров, перевезенных морским путем. Это ознаменовало начало полного отказа от морских судов как главного транспортного средства, использовавшегося для перемещения пассажиров между материками, и наступление эры реактивной транспортной авиации, длящейся и по сей день.

Современное воздушное судно – это летательный аппарат, поддерживаемый в атмосфере за счёт взаимодействия с воздухом, отличного от взаимодействия с воздухом, отражённым от поверхности земли или воды [1].

Воздушные суда, используемые в качестве транспортных средств, обладают рядом преимуществ:

- высокая скорость перемещения;
- возможность доставки пассажиров и грузов в изолированные регионы;
- отсутствие зависимости от рельефа.

Не лишён воздушный транспорт, однако, и недостатков, среди которых можно выделить следующие:

- высокая стоимость перевозок;
- зависимость от метеорологических условий;
- необходимость в аэропортах;
- относительно малая грузоподъёмность.

В совокупности, эти преимущества и недостатки определили роль современной авиации как средства доставки дорогостоящих и скоропортящихся товаров и одного из приоритетных видов транспорта жителей экономических развитых государств.

1.2 Общие сведения о загрязнении атмосферы воздушным транспортом

По данным Международной организации гражданской авиации (International Civil Aviation Organization, ICAO), в 2017 году в мире насчитывается 29236 воздушных турбовинтовых и турбореактивных судов, которые осуществили перевозку 4 млрд пассажиров и 56 млн тонн грузов [2]. Таблица 1 позволяет увидеть динамику роста объёма перевозок.

Таблица 1 – Динамика развития воздушного транспорта

| Год | Пассажиры, млн | Годовой прирост, % | Груз, млн т | Годовой прирост, % |
|------|----------------|--------------------|-------------|--------------------|
| 2008 | 2500 | 1,5 | 39,9 | -3,2 |
| 2009 | 2490 | -0,4 | 39,9 | -0,8 |
| 2010 | 2707 | 8,7 | 47,2 | 19,2 |
| 2011 | 2872 | 6,1 | 48,2 | 2,2 |
| 2012 | 3006 | 4,6 | 47,5 | -1,4 |
| 2013 | 3140 | 4,5 | 48,6 | 2,3 |
| 2014 | 3319 | 5,7 | 50,2 | 3,3 |
| 2015 | 4558 | 7,2 | 50,5 | 0,5 |
| 2016 | 3797 | 6,7 | 52,3 | 3,7 |
| 2017 | 4071 | 7,2 | 56,1 | 7,3 |

В Таблице 1 собраны данные о пассажирских и грузовых авиаперевозках за период с 2008 по 2017 года, которые показывают, что грузовые авиаперевозки хоть и в значительной мере зависят от текущего состояния экономики развитых государств, но в целом увеличились за последнее десятилетие в 1,4 раза. Иная картина предстаёт при оценке пассажирских перевозок. Так, начиная с 2008 года, видна чёткая тенденция к росту пассажиропотока, что позволило за последнее десятилетие увеличить объём пассажирских перевозок в 1,6 раза.

По данным ИКАО, 26,2 % пассажиров пришлось на Европу, 32,1 % – на Азию, а 27,7 % на Северную Америку [2], ситуация с грузоперевозками схожая (24,6; 33,4 и 23,7 %, соответственно) что подтверждает неравенство отдельных регионов планеты в возможностях пользования воздушным транспортом.

В пятёрку наиболее развитых «воздушнотранспортных стран» в области перевозок грузов и пассажиров, по данным того же отчёта ИКАО, ожидаемо вошли США, Китай, ОАЭ, Великобритания и Германия. Российская Федерация находится 7 месте, уступая, помимо названных выше стран, лишь Японии [2].

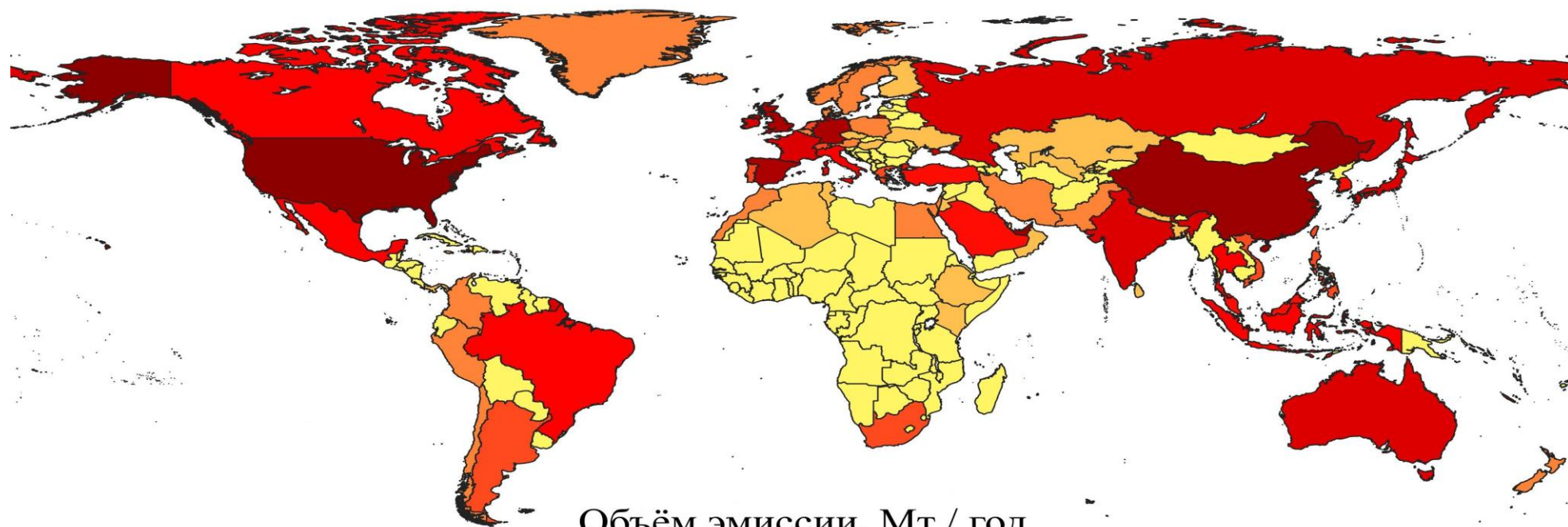
Необходимую для перемещения энергию воздушное судно получает из топлива. В результате сгорания авиационного топлива высвобождается энергия, которая и делает возможным перемещение авиационного транспорта.

Данная работа не ставит целью детально рассмотреть технические особенности применения топлива в авиации. Вместо этого будут обобщены наиболее важные в контексте применения биотоплива для снижения выбросов парниковых газов аспекты функционирования двигателей. Кроме того, более подробно применяемые в авиации виды топлив будут рассмотрены в следующих частях работы.

Так, подавляющее большинство современных воздушных судов используют реактивные двигатели и авиационный керосин, при сжигании которого выделяется широкий спектр химических веществ, таких как угарный и углекислый газы, сероводород, окислы азота и серы, углеводороды, сернистый газ и так далее.

В данной работе не рассматриваются эти соединения по отдельности, вместо них была выбрана более удобная в использовании концепция эквивалента углекислого газа (CO_2 экв), применяемая в литературных и научных источниках, изученных при выполнении работы. Стоит также отметить, что под «загрязняющими веществами» в данной работе понимаются именно парниковые газы.

Как было сказано ранее, распределение воздушного транспорта по миру неравномерно, ввиду чего неравномерным является и распределение выбросов загрязняющих веществ, что отображает Рисунок 1.



Объём эмиссии, Мт / год

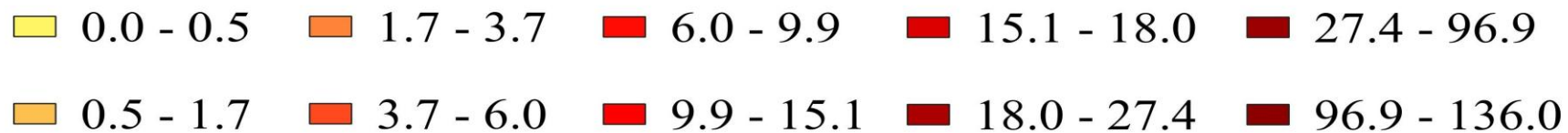


Рисунок 1 – Распределение выбросов углекислого газа по странам

На Рисунке 1 отображены данные распределения выбросов углекислого газа по странам. По ним видно, что основной вклад в эмиссию вносят страны Северной Америки, Западной Европы и Восточной Азии.

Современное законодательство практически любой страны подчёркивает важную роль воздушной среды в жизнедеятельность человека, например, в Российской Федерации атмосферный воздух рассматривается как жизненно важный компонент окружающей среды [3].

Требования законодательства в сочетании с преобладанием указанных выше стран в общей структуре эмиссий и объясняет их лидерство в деле разработки методов снижения выбросов загрязняющих веществ авиационным транспортом в целом, а также производства и применения биотоплива в частности.

Несмотря на относительно маленькую долю в общемировой структуре пассажиро- и грузоперевозок (3 % и 1 %, соответственно, [4]), воздушный транспорт имеет гигантский потенциал к росту, реализующийся на протяжении последних лет, а значит, необходимость пристального внимания к авиации с экологической точки зрения не вызывает сомнений.

1.3 Пути снижения выбросов загрязняющих веществ

В целях недопущения продолжения роста эмиссии загрязняющих веществ и достижения так называемого нейтрального выброса углерода, ICAO была введена Схема компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA).

CORSIA – глобальная рыночная система мер, которая направлена на достижения ограничения выбросов углерода на уровне 2020 года (нейтрального выброса углерода, упомянутого ранее). Данная система предполагает ряд мер, среди которых можно выделить и развитие современных технологий в области воздушного транспорта.

Кроме того, Комитет ИКАО по охране окружающей среды от воздействия авиации (Committee on Aviation Environmental Protection, CAEP) провел оценку тенденций потребления авиационного топлива и выбросов CO₂, которая представлена на Рисунке 2 [5].

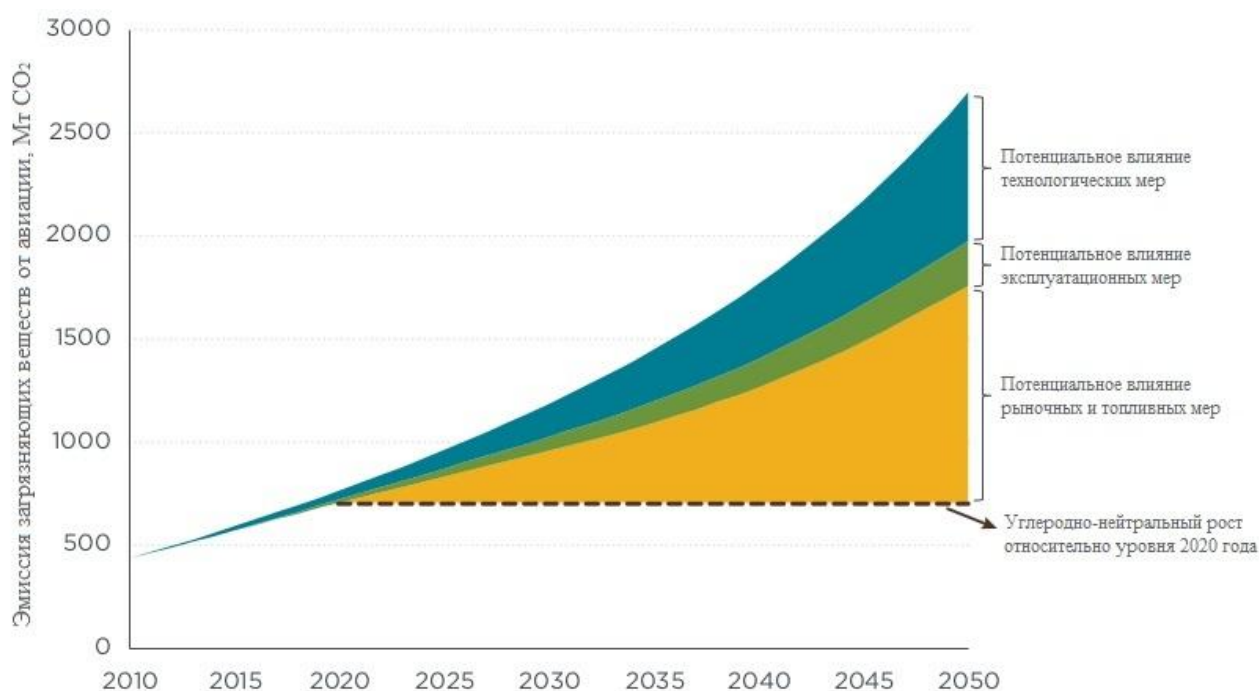


Рисунок 2 – сценарии динамики эмиссии парниковых газов

На Рисунке 2 отображены различные сценарии выбросов парниковых газов вплоть до 2050 года. Под сценарием подразумевается применение комплекса мер по снижению эмиссий, среди которых можно выделить следующие:

- технологические – совершенствование технических особенностей воздушных судов и двигателей;
- эксплуатационные – улучшение систем связи, навигации, управления воздушным движением;
- рыночные – развитие систем платы за выбросы, покупки и продажи квот;
- топливные – замена традиционного топлива на альтернативное.

Именно последним мерам, топливным, в частности, биологическому направлению, и посвящена данная работа. Помимо изменения сырьевой основы топлива, предполагается изменить и характеристику эмиссий на протяжении жизненного цикла этого топлива, что иллюстрируют Рисунки 3 и 4 [6].

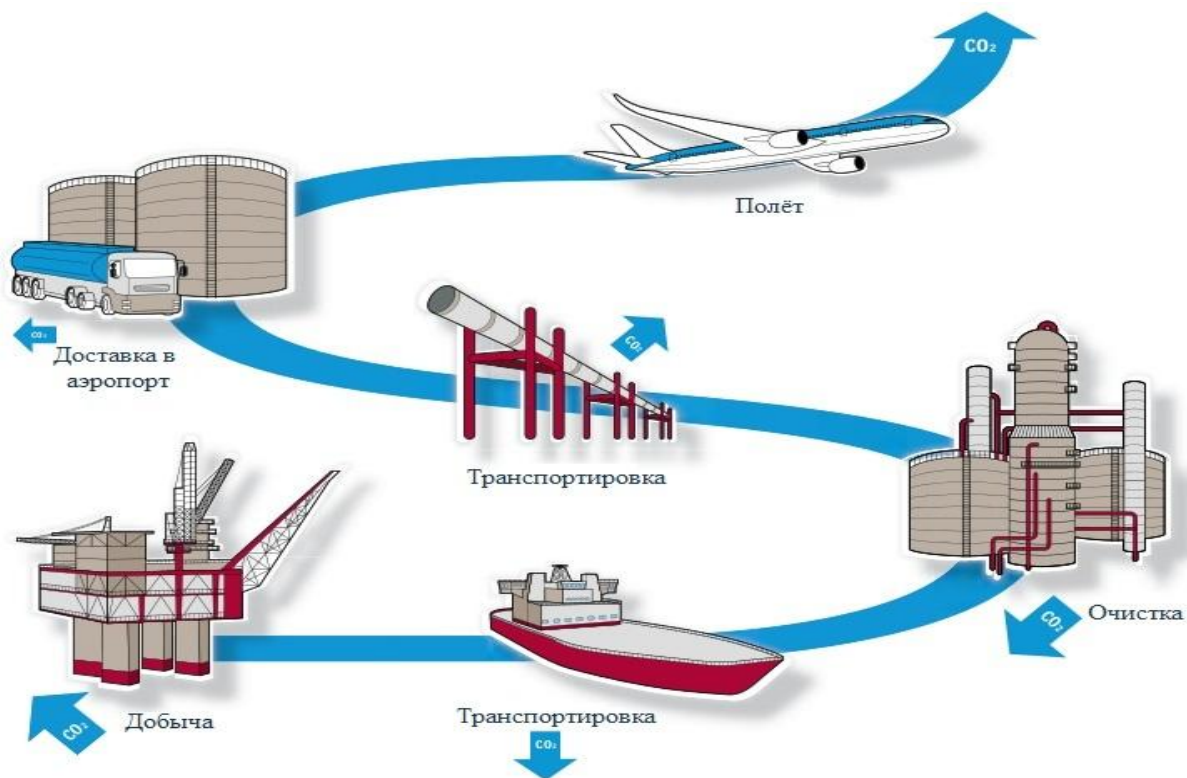


Рисунок 3 – Традиционное авиационное топливо

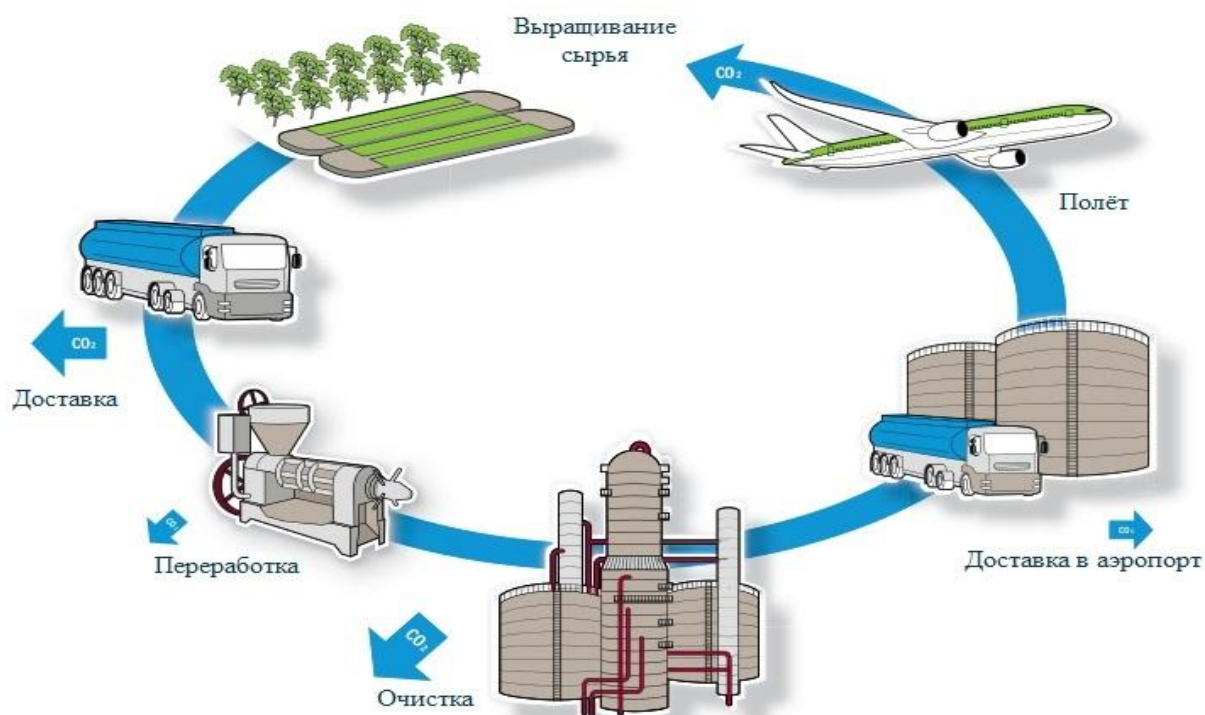


Рисунок 4 – Устойчивое авиационное топливо

Так, на протяжении жизненного цикла традиционного топлива происходит выделения парниковых газов в окружающую среду и до его непосредственного сжигания в ходе процессов добычи сырья, его переработки и транспортировки, что показано на Рисунке 3.

Жизненный цикл же устойчивого авиационного топлива (Sustainable aviation fuel, SAF) характеризуется частичным или полным поглощением выделяемых загрязняющих веществ сырьём, а именно – топливными растениями, что отображено на Рисунке 4. Устойчивое авиационное топливо, равно как и авиационное биотопливо в более широком смысле, также будет более подробно рассмотрено в последующих главах.

Стоит отметить, что в контексте данной работы «биотопливо», «альтернативное топливо», «авиационное топливо биологического происхождения» и прочие термины сходные по смыслу являются синонимами, как и «традиционное топливо», «минеральное топливо» и т.д.

Глава 2. Биотопливо как способ снижения эмиссии парниковых газов

Исторически главным топливом для авиационного транспорта являлась именно минеральная его разновидность, производимая из нефти. В отличие от любого другого вида транспорта, авиация крайне зависима от данного вида топлива, ввиду его высокой удельной энергии. Действительно, реактивное топливо, полученное из нефти, содержит наибольшее количество энергии, приходящейся как на единицу массы, так и на единицу объёма [7], что и обуславливает его применение в сфере авиации, где грузоподъёмность и вместительность воздушного судна крайне ограничены.

Тем не менее, первые попытки найти альтернативу минеральному авиационному топливу стали предприниматься довольно давно. Можно выделить несколько причин, их обуславливающих:

- стремление улучшить технические характеристики самолётов за счёт более технологичных и эффективных видов топлива;
- зависимость поставок нефти от геополитической ситуации (примером тому служит эмбарго стран ОПЕК в 1973-1974 годах);
- опасения скорого достижения «пика нефти», что способно резко повысить цену топлива.

В совокупности эти причины стали мощным стимулом к дальнейшим исследованиям. Работы в этом направлении проводились в США и некоторых странах Европы, а 15 апреля 1988 года состоялся полёт советского экспериментального самолёта ТУ-155, оборудованного двигателем, использовавшим в качестве топлива жидкий водород [8].

Окончание в начале 1980-х годов второго энергетического кризиса привело к снижению и стабилизации цен на нефть, ввиду чего интерес правительств к поискам альтернативного топлива стал спадать, а распад Советского Союза привёл к отмене программы разработки отечественного водородного самолёта.

Со временем перед использующим воздушный транспорт миром встала принципиально новая проблема, экологическая, связанная с выделением 3,2 кг CO₂, наиболее распространённого парникового газа, при сжигании 1 кг реактивного топлива [7]. В целом, как упоминалось ранее, с начала «индустриального века» концентрация CO₂ в атмосфере увеличилась с 280 ‰ в 1850 году до 400 ‰ в 2015 [7], а на авиацию приходится около 2,5 % выбросов CO₂, связанных с использованием энергии [9]. Отмеченная ранее устойчивая тенденция к росту воздушного транспорта позволяет прогнозировать дальнейшее загрязнение атмосферы парниковыми газами, выделяемыми в том числе и авиацией.

Следствием заключенного в 2015 году между 197 странами Парижского соглашения Рамочной конвенции Организации Объединённых Наций стало возрождение интереса к поискам альтернативного вида топлива, однако в этот раз был достигнут консенсус о невозможности перехода к водородным самолётам ввиду чрезвычайной капиталоемкости обновления самолётного парка и переоборудования существующей инфраструктуры.

За отправную точку для поисков альтернативного топлива был взят пример успешной коммерциализации биодизельного топлива в автомобильном транспорте. Возникший интерес к топливам на основе биомассы, не требующих изменений существующей инфраструктуры и способных выступать как дополнение к традиционному реактивному топливу, положил начало качественно новой эпохе исследований в области альтернативного топлива.

2.1 Поколения и виды биотоплива

Биотопливо является источником энергии, полученным из недавно выращенной биомассы растительного и животного происхождения. Однако ввиду достаточно широкого спектра возможного сырья для производства такого вида топлива, различных технологических процессов, о которых будет рассказано позднее, а также качественно разных характеристик жизненного

цикла, биотопливо имеет несколько разновидностей, называемых поколениями. На сегодняшний день насчитывается три поколения биотоплива [6, 10].

2.1.1 Первое поколение биотоплива

Биотопливо первого поколения производится непосредственно из пищевых культур и продуктов животного происхождения. Сырьём для производства данного вида топлива служит крахмал, сахара, растительное масло, в некоторых случаях – животные жиры.

Рассмотрим наиболее важные и распространённые виды конкретных видов растительных культур, применяемых в качестве сырья. В их число входит кукуруза, сахарный тростник, соевые бобы, растительные масла.

На данный момент, основным сырьём в структуре мирового производства биотоплива являются простые сахара, полученные из крахмала, содержащегося в кукурузе, или сахарного тростника [11].

Кукуруза

Как отмечалось ранее, кукуруза является одним из основных видов сырья для производства топливного этанола в мире.

В основном для производства топлива из неё используется крахмал, содержащийся в семенах, однако возможно и применение лигноцеллюлозы, содержащейся в стеблях, листьях и прочих отходах производства кукурузы.

Кукуруза является доминирующим сырьём для производства биотоплива в США [11]. По состоянию на 2016 год, более 40 процентов урожая кукурузы в США использовалось для производства кукурузного этанола [10].

Сахарный тростник

Сахарный тростник также занимает важное место в структуре сырья для производства биотоплива и в структуре сельского хозяйства в целом. Именно сахарный тростник является крупнейшей в мире культурой по количеству выращенного урожая, приблизительно треть которого в Бразилии используется для производства биотоплива [11].

Локомотивом производства топливного сахарного тростника является именно Бразилия, реализующая политику содержания в своём автомобильном

бензине как минимум 20 % биоэтанола [12], получаемого, главным образом, как раз из сахарного тростника.

В отличие от кукурузы, сахарный тростник дает сахар, а не крахмал, который легче превращается в спирты.

Растительные масла

Растительные масла может быть получены практически из любого вида и количества растений. При этом, они способны попадать сразу в два поколения биотоплива, в зависимости от момента использования – до или после употребления в качестве пищевого продукта и утраты потребительских свойств как продукта питания.

Триглицеридные масла являются альтернативой сахарам и крахмалам в сфере производства биотоплива первого поколения.

В данном случае рассматриваются растительные масла, являющиеся сырьём для первого поколения биотоплива, произведённое специально для переработки в альтернативное топливо.

К растениям, переработка которых способна дать сырьё для дальнейшего производства биотоплива первого поколения можно отнести рапс, культивируемый преимущественно в ЕС, сою, широко распространённую в Северной и Латинской Америках, масличную пальму, особенно популярную в азиатских странах [11].

Процессы переработки

Рассмотренные выше виды сырья на своём жизненном пути претерпевают существенные изменения ввиду участия их в различных производственных процессах, которые приводят к образованию промежуточных продуктов и, впоследствии, топлива.

Одним из таких промежуточных продуктов являются биоспирты.

Биоспирты – это спирты, получаемые при использовании ферментов и микроорганизмов в процессе ферментации крахмала и сахара. Наиболее известным и массовым результатом такого процесса является этанол, хотя помимо него при брожении образуются, например, пропанол и бутанол.

Образование биоспиртов – результат сбраживания крахмала кукурузы и сахаров сахарного тростника. В дальнейшем, в результате дегидратации, олигомеризации и гидроочистки, спирты будут превращены непосредственно в альтернативное авиационное топливо.

Соевые бобы и прочие растительные масла, например, рапсовое и пальмовое, в результате гидроочистки, сразу превращаются в авиационное биотопливо.

Для производства авиационного биотоплива из сахарного тростника и кукурузы применяется биохимическая конверсия, а из растительных масел – липидная конверсия [13].

Эти процессы и получаемые в результате виды топлива будут рассмотрены более подробно в соответствующем разделе работы.

Несмотря на принципиальную возможность получения альтернативного авиационного топлива из данных видов сырья, нельзя не отметить довольно значительные слабые стороны каждого из них.

На данный момент, кукуруза, сахарный тростник, соевые бобы и прочие растительные масла не являются перспективными видами сырья для производства альтернативного авиационного топлива. Главным образом это связано с их основным назначением – использованием в качестве продукта питания. Масштабное производство такого топлива способно серьезно изменить ситуацию на рынке пищевых продуктов, результатом чего может стать изменение цен на пищевые продукты, голод в отдельных регионах планеты, снижение общемировой стабильности и устойчивости.

Таким образом, на смену первого поколения биотоплива пришло второе поколение, начиная с которого авиационное топливо биологического происхождения становится устойчивым авиационным топливом (Sustainable Aviation Fuel).

2.1.2 Второе поколение биотоплива

Устойчивое авиационное топливо – сертифицированная согласно существующим топливным стандартам смесь традиционного минерального и

альтернативного возобновляемого керосина, использование которой в авиации возможно без каких-либо технических модификаций самолёта [14].

Сфера применения данного понятия более широка, чем у авиационного биотоплива, ввиду возможности использования сырья не только биологического происхождения. Однако в данной работе рассматривается топливо, произведённое путём переработки именно биологического сырья.

Введение специального термина было обусловлено наличием у данного вида топлива ряда ключевых особенностей [6, 14]:

- соответствие техническим и сертификационным требованиям (например, ГОСТ, стандарты ASTM);
- меньший уровень эмиссии парниковых газов в течении жизненного цикла, чем у традиционного авиационного топлива;
- производство не из минерального сырья, а, например, из растительных масел, коммунальных и сельскохозяйственных отходов, отработанных газов;
- возобновляемое сырьё, не способствующее истощению природных ресурсов, изменению климата, возникновению негативных социальных последствий.

Особого внимания заслуживает последняя ключевая особенность. В отличие от биотоплива первого поколения, второе и третье поколения биотоплива не используют в качестве сырья потенциальные пищевые продукты, ввиду чего исключается возможность изменения экономических условий рынка продовольствия и возникновения нежелательных социальных явлений.

Таким образом, среди видов топлива биологического происхождения наиболее желательными и предпочтительными для использования в авиационной отрасли являются такие подмножества устойчивого авиационного топлива, как второе и третье поколение биотоплива.

Рассмотрим сырьё, используемое для производства биотоплива второго поколения. Одним из главных требований, к нему предъявляемых, является невозможность или ограниченность использования человеком в пищу, а также выращивание на землях, имеющих низкую ценность для сельского хозяйства.

Важно отметить и то, что сырьё для устойчивого авиационного топлива не должно требовать для своего выращивания большого количества водных ресурсов, минеральных и органических удобрений, а также пестицидов и прочих химических средств.

Злаки

Ряд травянистых растений, таких как просо прутьевидное (*Panicum virgatum*), сорговник поникающий (*Sorghastrum nutans*) и целый род мискантус (*Miscanthus*), рассматривается в качестве источника лигноцеллюлозы и крахмала для производства биотоплива.

В зависимости от конкретной климатической зоны выбирается наиболее подходящий злак. Например, в Азии наиболее широкое распространение получили мискантусы, а в США – просо прутьевидное [11].

Ятрофа

Ятрофа (главным образом, *Jatropha curcas*) – устойчивый к засухе кустарник, содержащий семена с высоким содержанием (от 30 до 40 % [6]) масла. Ввиду токсичности семян ятрофы для людей и животных, использовать в качестве пищевого продукта кустарник невозможно. Семена данного растения изображены на Рисунке 5 [15].



Рисунок 5 – *Jatropha curcas*

Особенно популярным сырьём для производства биотоплива данное растение стало в начале XXI века [10].

В числе его главных достоинств ятрофы – возможность выращивания растения в засушливых и непахотных районах, что позволяет использовать более ценные земли для производства пищевых продуктов, а также высокое содержание растительных масел, используемых в производстве биотоплива.

Камелина

Камелина (*Camelina sativa*, рыжик посевной) – однолетняя трава, преимущественно техническая культура с высоким содержанием масла в семенах, используемого для производства биотоплива. Применяемая в производстве биотоплива камелина изображена на Рисунке 6 [16].



Рисунок 6 – *Camelina sativa*

Основной способ использования масла рыжика – производство устойчивого топлива, кроме того, неиспользованные в ходе переработки части

растения могут быть использованы в качестве корма для сельскохозяйственных животных.

Стоит отметить, что камелина часто участвует в севооборотах с другими посевными культурами в течение года. Таким образом, данное растение даёт возможность диверсифицировать сельскохозяйственное производство и не оказывать высоких и постоянных нагрузок на почву.

Процессы переработки

Как отмечалось ранее, при производстве биотоплива из злаков используется содержащаяся в них лигноцеллюлоза и крахмал.

Лигноцеллюлоза – комплекс лигнина, гемицеллюлозы и целлюлозы, составляющий структурный каркас клеточной стенки растений.

В процессе производства из неё устойчивого авиационного топлива сырьё подвергается биохимической конверсии, с образованием глюкозы в результате протекания гидролиза.

Затем глюкоза и крахмал, полученный из семян данных злаков, подвергаются процессам, в общих чертах описанным в соответствующем разделе биотоплива первого поколения, посвящённым производству топлива из сахара.

Кроме того, существует иной путь обработки лигноцеллюлозы, при котором она подвергается пиролизу или процессу Фишера-Тропша.

Существенным недостатком производства топлива на основе содержащихся в злаках лигноцеллюлозы и крахмала является сложность, связанная с широким спектром необходимых для этого процессов, что становится ясно даже из представленного выше описания.

Такого недостатка лишён другой способ производства биотоплива, липидная конверсия, о которой упоминалось в описании первого поколения биотоплива. Как и в случае с растительными маслами, например, сои, масла, получаемые из камелины и ятрофы, относительно легко перерабатываются в авиационное топливо, являющееся, к тому же, устойчивым.

В целом, на сегодняшний день биотопливо, получаемое в результате переработки именно злаков, камелины и ятрофы является одним из наиболее перспективным с точки зрения экономических, социальных и экологических аспектов [13].

Описанные в данном разделе процессы и получаемые в результате виды топлива будут в дальнейшем визуализированы, а затем рассмотрены более подробно в соответствующем разделе работы.

Кроме того, будут рассмотрены и наиболее важные с точки зрения данной работы особенности применения авиационного топлива, экономические, социальные и экологические последствия их производства и использования.

2.1.3 Третье поколение биотоплива

Термин «биотопливо третьего поколения» обозначает биотопливо, полученное путём переработки водорослей.

Ранее топливо, полученное в результате обработки водорослей, смешивалось с биотопливом второго поколения, однако ввиду возможности обеспечить чрезвычайно высокую урожайность, превышающую таковую у других видов сырья, топливо на основе водорослей имеет смысл выделить в отдельное поколение. Так, некоторые виды водорослей способны накапливать более 60 % липидов в сухом весе, обеспечивая урожайность уровня 90000 л/га [11].

В данном контексте водоросли представляют собой большую группу фотосинтетических организмов, живущих, в зависимости от вида, в пресной, солоноватой или солёной воде [17].

Одним из главных достоинств водорослей как сырья для производства топлива является широкий спектр возможных конечных продуктов их переработки. Например, из данного вида сырья возможно производить биодизель, бутанол, метанол, этанол, в зависимости от генетических модификаций конкретного вида водоросли [10].

Также к числу достоинств можно отнести и разные возможные способы выращивания топливных водорослей.

Открытые пруды – самые простые системы, в которых водоросли выращиваются на открытом воздухе. Они просты в строительстве и установке, требуют низких капитальных затрат, но менее эффективны, чем другие системы по выращиванию водорослей. Кроме того, необходимо учитывать возможность попадания в пруд других организмов, способных нанести существенный вред выращиваемым топливным водорослям. Открытые пруды для выращивания водорослей представлены на Рисунке 7 [18].



Рисунок 7 – открытые пруды для выращивания водорослей

Закрытые пруды – пруды, не подвергающиеся воздействию атмосферы и использующие закрытую систему подачи углекислого газа.

К достоинству таких систем можно отнести возможность напрямую связать их с источником углекислого газа, например, дымовыми трубами, и, таким образом, предотвратить или ослабить загрязнение атмосферы.

Фотобиореакторы – биореактор, использующий источник света для культивирования фототрофных микроорганизмов. Эти организмы используют фотосинтез для получения биомассы из света и углекислого газа.

Фотобиореакторы могут использоваться для выращивания, помимо различных водорослей, некоторых растений, мхов, бактерий.

Такая система выращивания водорослей является наиболее капиталоемкой и сложной в техническом отношении, имеющей, впрочем, и наиболее высокую урожайность среди описанных вариантов. На Рисунке 8 представлен один из фотобиореакторов [19].

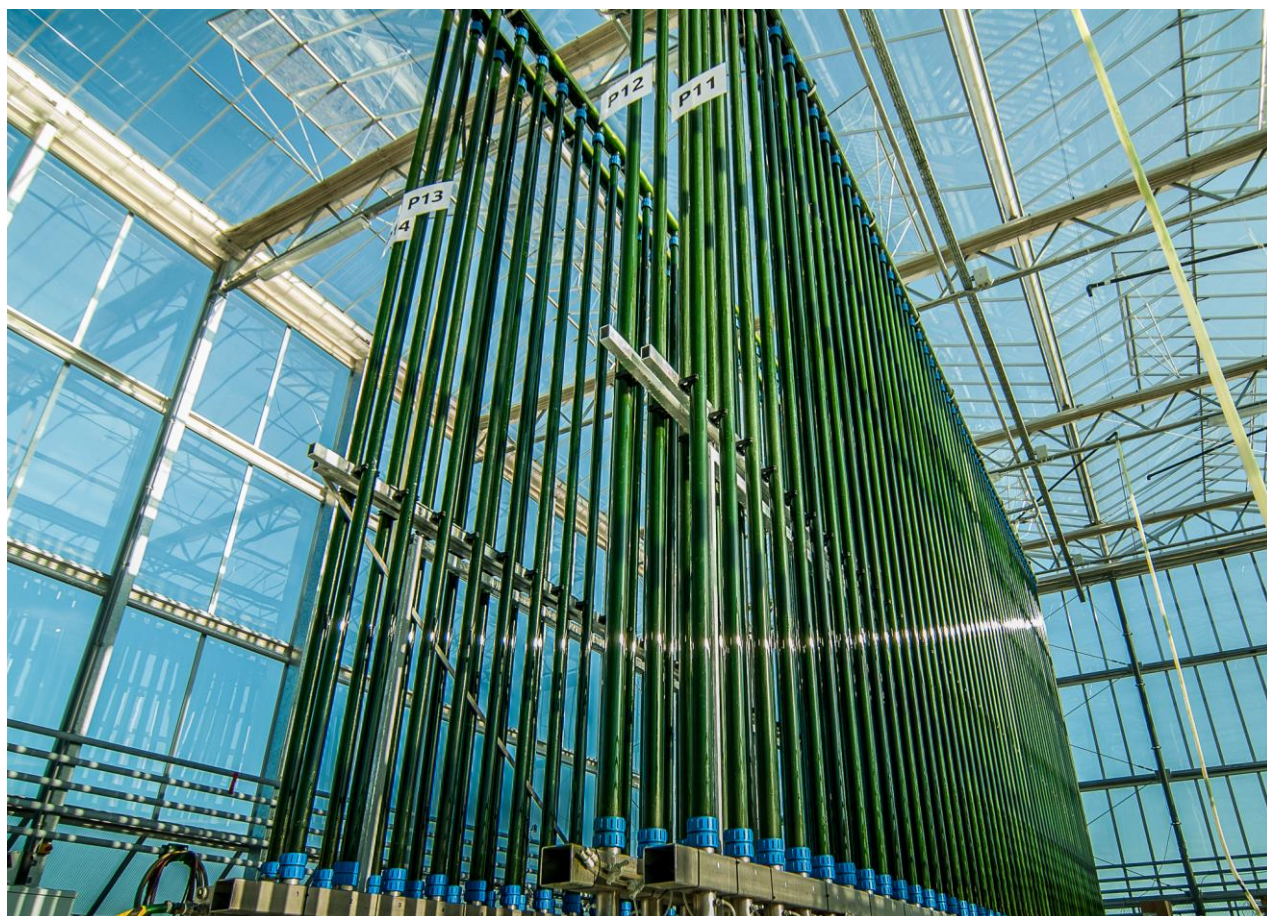


Рисунок 8 – Фотобиореактор для выращивания водорослей

Все три системы имеют важную особенность – их можно эксплуатировать в местах, не предназначенных для ведения сельского хозяйства. И если открытые пруды требуют для своего успешного функционирования комфортные климатические условия, то закрытые пруды и фотобиореакторы способны

устанавливаться практически где угодно. Более того, топливные водоросли возможно выращивать в сточных водах, что означает, что они способны частично перерабатывать муниципальные отходы и улучшать функционирование городской канализационной системы.

В то же время, водоросли как источник сырья для производства авиационного биотоплива имеют и отрицательные стороны.

К ним относится чрезвычайно большая потребность в воде, а также фосфорных и азотных удобрений. Производство последних также приводит к выбросу парниковых газов, что делает неоднозначной экологическую выгоду производства биотоплива именно из этого источника сырья.

Кроме того, неоднозначными перспективы использования водорослей делает и высокая цена производства водорослевого масла, варьирующаяся, к тому же, в достаточно широком диапазоне (От 2 до 24 \$/л) [11].

В настоящий момент ведётся активная научная деятельность, направленная на повышение эффективности выращивания водорослей, однако пока не понятно, какая революционная технология должна резко повысить экономическую конкурентоспособность данного вида сырья.

Процессы переработки

На данный момент ведутся научные изыскания в области альтернативных путей переработки масел, содержащихся в водорослях, в альтернативное топливо, однако наиболее изученным и обкатанным является способ, сходный с переработкой растительных масел, камелины и ятрофы, липидная конверсия.

2.1.4 Виды альтернативного биологического топлива

В работе были рассмотрены выделяемые на сегодняшний день поколения альтернативного авиационного топлива биологического происхождения, описаны основные виды сырья, необходимых для их производства, рассмотрены их слабые и сильные стороны.

Кроме того, обозначено понятие устойчивого авиационного топлива, имеющую особенную актуальность в современных экономических,

экологических и социальных условиях, и определены процессы, протекающие при производстве этого и прочих видов авиационного биотоплива.

Для дальнейшего раскрытия темы представим данную информацию в Таблице 2.

Таблица 2 – Виды биотоплива

| Поколение биотоплива | Сырьё | Процессы | Топливо на выходе |
|----------------------|--|--|-------------------|
| 1 | Кукуруза, сахарный тростник | Спиртовое брожение, дегидратация, олигомеризация, гидроочистка | ATJ |
| | | Брожение | SIP |
| | Растительные масла (soя, рапс, пальма) | Гидроочистка | HEFA |
| 2 | Злаки | Газификация, процесс Фишера-Тропша, гидроочистка | F-T |
| | | Гидролиз, спиртовое брожение, дегидратация, олигомеризация, гидроочистка | ATJ |
| | Растительные масла (камелина, ятрофа) | Гидроочистка | HEFA |
| 3 | Растительные масла (водоросли) | Гидроочистка | HEFA |

В Таблице 2 представлена информация, описывающая сочетание сырья и способа его обработки, которые образуют технологию производства биотоплива, результатом которой становится топливо, принимающее название конкретного процесса. В дальнейшем это топливо применяется в авиации.

Наиболее распространёнными на сегодняшний день видами альтернативного биологического топлива являются ATJ-топливо (Alcohol-to-jet), SIP-топливо (Synthesized iso-paraffins) или DSHC-топливо (Direct sugar to

hydrocarbons), F-T-топливо (Fisher–Tropsch synthesis) и HEFA-топливо (Hydroprocessed esters and fatty acids) [13].

Стоит отметить, что топливо одного вида, например, HEFA, способны попадать в разные поколения (в данном случае, во все 3) биотоплива, ввиду чего при тех или иных оценках альтернативного авиационного топлива важно учитывать и конкретное сырьё, ставшее основой для его производства.

Рассмотрим обозначенные в Таблице 2 технологии производства данных видов биотоплива.

2.2 Технологии производства биотоплива

В предыдущем разделе были рассмотрены разные поколения биотоплива, а также сырьевая база для их производства. Кроме того, были впервые упомянуты названия процессов производства биологического альтернативного топлива. Таковых можно выделить 4: ATJ, SIP, F-T, HEFA. Таким образом, название биотоплив совпадает с названием процесса, в результате которого они были получены.

В разделе будут в общем виде рассмотрены данные процессы производства. Ввиду сложности протекания и объёмности описания химических реакций, составляющих эти процессы, описаны они будут крайне схематично, ибо данная работа не несёт в себе цель подробно и глубоко разобраться в химизме превращений и изменений, коим подвергаются описанные ранее виды сырья.

2.2.1 ATJ

Спиртовое топливо (ATJ-топливо) – биотопливо, полученное путём переработки спиртов, таких как метанол, этанол, бутанол, жирных спиртов [10].

Спирты, необходимые для производства авиационного топлива, могут быть получены разными путями. Выбор исходного сырья может влиять на многие факторы, в частности, конкретные методы обработки в ходе

производства, объём спиртов на выходе, экономичность всего процесса в целом.

На Рисунке 9 изображена схема процесса производства спиртового топлива [10].



Рисунок 9 – Схема процесса производства АТJ-топлива

Как отмечалось ранее, наиболее популярным исходным сырьём, используемым для производства АТJ-топлива, являются сахара сахарного тростника и кукурузный крахмал (первое поколение), а также лигноцеллюлозной биомассы злаковых растений (второе поколение).

Первым процессом на пути производства АТJ-топлива является спиртовое брожение.

Брожение – ферментативное расщепление органических веществ, преимущественно углеводов [20].

В ходе данной биохимической реакции, осуществляемой микроорганизмами, различные углеводы, преимущественно глюкоза, преобразуются в молекулы этанола или бутанола и углекислого газа.

Получившийся в результате спиртового брожения этанол является наиболее массовым топливно-спиртовым продуктом в США и одним из наиболее распространённых в мире [21]. Результат ацетоно-бутилового

брожения, бутанол, также является перспективным промежуточным продуктом производства спиртового топлива.

Далее полученный спирт подвергается поочередно дегидратации, олигомеризации и гидроочистке.

Рассмотрим подробнее эти этапы.

Дегидратация – химический процесс, в ходе которого происходит отщепление воды от молекул некоего соединения, в данном случае, спирта, осуществляемый термически в присутствии катализаторов или под действием веществ, связывающих воду [22]. В результате протекания процесса дегидратации из спирта (этанола или бутанола) образуется алкен этилен (олефин), подвергающийся уже олигомеризации.

Олигомеризация – химический процесс образования олигомеров, молекул в виде цепочки из небольшого числа одинаковых составных звеньев [23]. Смесь олигомеризованных олефинов в дальнейшем подвергается гидроочистке.

Гидроочистка – химический процесс, осуществляемый с целью получения бензинов, дизельных и реактивных топлив [24]. Основное назначение гидроочистки – удаление соединений серы, азота и уничтожение металлоорганических соединений.

Стоит отметить, что производство АТJ-топлива является весьма трудоёмким, требует осуществления довольно широкого спектра химических процессов.

Результатом проведённой гидроочистки является АТJ-топливо, прочем, ещё не готовое к использованию на воздушном транспорте.

Критерием допустимости применения топлива для авиаперевозок является сертификация, разобранный в соответствующей части данной работы.

2.2.2 SIP

Синтетический изопарафин (SIP) – вид биологического альтернативного топлива, также получаемый из сахаров в результате брожения под действием генетически модифицированных организмов, но с образованием отличных от АТJ-процесса продуктов, фарнезенов [13].

Итогом обработки этих изопреноидов является SIP-топливо.

Стоит отметить, что именно этот вид биотоплива одним из первых прошёл сертификацию и вошёл в массовое использование, однако ввиду его безальтернативной на данный момент сырьевой базе, относящейся к первому поколению, и некоторых других особенностей, более подробно разобранных в разделе работы, посвящённом сертификации топлива, данный вид альтернативного авиационного топлива не рассматривается в качестве приоритетного.

2.2.3 F-T

F-T-топливо – биотопливо, полученное путём применения синтеза Фишера-Тропша.

Синтез Фишера-Тропша – технология конверсии, способная превратить любой углеродсодержащий материал в нефтепродукт, который может быть затем переработан в топливо для транспорта и продукты нефтехимии.

Создание F-T-топлива включает в себя три последовательных этапа: преобразование используемой биомассы в синтез-газ или сингаз(смесь CO, H₂ и CO₂) посредством газификации при повышенных температурах, преобразование синтез-газа в нефть при помощи собственно процесса Фишера-Тропша, переработка нефти при помощи гидроочистки.

Рассмотрим подробнее обозначенные выше этапы.

Газификация – термохимический процесс частичного окисления углеродсодержащего сырья, например, обозначенного ранее сырья для биотоплива второго поколения, сорговника, просо, мискантуса [25].

Результатом успешного протекания газификации является синтез-газ, представляющий собой смесь водорода, оксида углерода и большого количества других соединений, подлежащих удалению. После завершения подготовки газа осуществляется синтез Фишера-Тропша.

Процесс Фишера-Тропша – каталитического гидрирование оксида углерода с образованием смеси углеводородов [26]. Данный процесс позволяют

получать синтетические углеводороды, пригодные для дальнейшего использования в качестве синтетического топлива.

Результатом обработки синтез-газа методом Фишера-Тропша является нефть биологического происхождения, подвергающаяся в дальнейшем гидроочистке, аналогичной гидроочистке АТJ-топлива. Таким образом, на выходе всего процесса образуется F-T-топливо, ещё один вид альтернативного биологического топлива, являющийся, к тому же, устойчивым.

2.2.4 HEFA

HEFA-топливо (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) – биотопливо, полученное путём гидроочистки растительных жиров и масел.

Экстрагированное из различных видов сырья (рапс, соя, камелина, ятрофа, водоросли) масло подвергается гидроочистке, в ходе которой масло разлагается. Затем происходит удаление из него нежелательных химических соединений, таких как сера, азот, некоторых других, насыщение двойных углеродных связей и удаление воды.

Топливо, полученное в результате такого процесса производства, готово к использованию, особенности которого будут рассмотрены в следующем разделе, посвящённом предъявляемым к авиационному биотопливу требованиям и существующей системе его сертификации. Кроме того, такой путь производства позволяет получать и другие конечные продукты, например, бензин, дизельное топливо.

Стоит отметить, что данная технология является относительно развитой и коммерчески доступной. В наши дни полёты воздушного транспорта осуществляются на данном топливе довольно часто [10].

2.3 Требования к авиационному биотопливу

На сегодняшний день, под термином «авиационное топливо» понимается именно минеральная его разновидность, авиационный керосин, ввиду тотального доминирования как в структуре производства и торговли, так и в структуре использования. Таким образом, для определения требований,

предъявляемых к биотопливу, необходимо разобраться с требованиями, предъявляемыми к авиационному топливу вообще.

Вместе с развитием реактивных двигателей, нефтяной промышленности в целом и технологий переработки нефтепродуктов в авиационное топливо в частности развивались и требования к данному виду топлива.

Исходным сырьём для производства авиационного топлива является нефть. В результате широкого спектра процессов переработки, топливо для реактивных двигателей представляет собой сложную смесь различных углеводородов, число которых иногда доходит до нескольких тысяч, ввиду чего анализ их химического состава становится нетривиальной задачей.

Таким образом, спецификации и требования реактивного топлива в значительной мере определяются с точки зрения требуемой производительности. В то же время, некоторые характеристики состава такого топлива, в частности, содержание определённых соединений, таких как ароматические углеводороды, также являются частью спецификации.

В целом свойства таких видов авиакеросина, как ТС-1 (применяемый в Российской Федерации) и Jet A-1 (распространённый в Европе и США) определяются ГОСТ 32595-2013 Топливо авиационное для газотурбинных двигателей Джет А-1 (JET A-1). Технические условия и ГОСТ 10227-2013 Топлива для реактивных двигателей. Технические условия, соответственно. Данные стандарты действуют на территории Российской Федерации. Кроме того, существуют их зарубежные аналоги Defence Standard 91-91 Turbine Fuel, Kerosine Type, Jet A-1, утверждённый Министерством обороны Великобритании и применяемый в Европе, и ASTM D1655-15d, разработанный в США. Кроме того, собственные стандарты топлива существуют у большинства крупных мировых компаний, занимающихся пассажирскими авиаперевозками.

Данные стандарты включают в себя исчерпывающие описания различных качественных и количественных характеристик авиационного топлива, а также методики их определения.

Некоторые из ключевых характеристик, наиболее актуальные в контексте рассмотрения внедрения биотоплива, представлены ниже [27, 28].

Низшая теплота сгорания (содержание энергии)

Во время полёта авиационное топливо используется в качестве запаса энергии, которая может быть превращён в работу, необходимую для осуществления полёта воздушного судна.

Поскольку доступный для хранения объём и масса топлива, которую способен нести самолёт, жёстко ограничены, авиационное топливо способно оказывать существенное влияние на лётно-технические характеристики воздушного судна. В частности, максимальная дальность полёта коммерческих авиарейсов в определённой степени зависит от количества содержащейся в топливе энергии.

Как упоминалось ранее, углеводородный состав конкретных объёмов топлива различен, ввиду чего в определённых пределах варьируется как количество энергии собственно углеводородов, так и общее содержание энергии.

Существующие топливные стандарты определяют минимальную теплоту сгорания, являющуюся, в большинстве случаев, отношением энергии на единицу массы. В то же время, отношение энергии на единицу объёма также является важной количественной характеристикой.

Температура начала кристаллизации (точка замерзания)

Современные воздушные транспортные средства эксплуатируются в течении длительных отрезков времени на больших высотах. Температура воздуха в таких условиях может достигать отметок в $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже. Таким образом, ввиду нахождения основных топливных баков в крыльях самолёта, при полётах топливо может охлаждаться до низких температур, что делает крайне важным возможность его использования даже в таких сложных условиях. Следовательно, существующие стандарты определяют максимальную допустимую точку замерзания.

Поскольку топливо для реактивных двигателей представляет собой смесь различных углеводородов, оно не замерзает при одной температуре, как это происходит, например, с водой в идеальных условиях. Скорее, углеводороды с большей температурой замерзания будут затвердевать раньше, создавая маленькие взвешенные в жидкости восковые кристаллы. С дальнейшим уменьшением температуры, топливо сначала превратится в «слякоть», а затем в некое подобие воскового блока.

Термоокислительная стабильность

Помимо собственно сжигания, авиационное топливо имеет ещё несколько менее очевидных назначений. Одно из них – охлаждение смазочного масла, а также некоторых компонентов двигателя. При повышенных температурах, некоторые из более активных веществ в топливе могут начать подвергаться химическим реакциям, которые могут привести к образованию камеди и нерастворимых частиц кокса в процессе коксования.

Эти смолы и твердые частицы могут откладываться на таких компонентах топливной системы, как фильтры, разрушать их и существенно изменять расход топлива. Кроме того, они также могут забивать форсунки для впрыска топлива или небольшие охлаждающие отверстия в камере сгорания или в турбине.

Химия коксования является сложной, ввиду чего термоокислительная стабильность топлива не может быть предсказана с должной точностью теоретически. Таким образом, стандарт определяет тест, при котором термоокислительная способность оценивается практически.

Вязкость

Внутри двигателя топливо впрыскивается под высоким давлением через форсунки, которые разбивают жидкость на мелкие капли. При этом вязкость топлива влияет как на форму распыла, выходящего из сопла, так и на размер получаемых капель.

Увеличение размера капли может привести к неполному сгоранию топлива, а также может затруднить повторный запуск двигателя на высоте.

Изменение схемы распыления также может привести к неоптимальному сгоранию топлива, а также создать неравномерное распределение тепловой энергии, что может привести к повреждению камеры сгорания или турбины.

Чтобы избежать этих проблем, существующие на сегодняшний день стандарты включают информацию о максимально допустимой вязкости топлива.

Зольность

Определённые классы углеводородов, присутствующие в реактивном топливе, способны к образованию мелких углеродистых частиц во время своего горения. Эти частицы имеют несколько негативных последствий для производительности двигателя.

Маленькие частички золы могут откладываться на внутренних поверхностях двигателя, что потенциально способно нарушить нормальную циркуляцию воздушного потока, а также забить различные охлаждающие отверстия. Кроме того, зола способна физически разрушать некоторые компоненты двигателя. И, наконец, данные частицы могут испускаться в виде дыма из двигателя, что при условии наличия в золе серы способно отрицательно влиять на окружающую среду, главным образом через образование в атмосфере оксидов серы. Современные стандарты топлива определяют максимально допустимые процентные концентрации зольных частиц, выделяющихся при сгорании топлива.

Коррозийность

Во время распределения по системам воздушного судна реактивное топливо вступает в контакт с широким спектром материалов, покрытий, металлов. Некоторые из присутствующих в топливе соединений могут вызывать коррозию металлических деталей.

Чтобы смягчить данную проблему, стандарт выдвигают требования по кислотности, содержанию йода, меркаптановой серы, смол, кроме того, отечественный стандарт выдвигает требования по выдерживанию испытания на медной пластинке.

Температура вспышки

Одними из наиболее важных свойств топлива, связанных с безопасностью, являются температура вспышки и его электрическая проводимость.

Поскольку движение топлива по различным системам воздушного судна способно генерировать статический электрический заряд, существует угроза воспламенения топлива в результате возникновения искры.

Стандарты включают требования к минимальной температуре вспышки и электропроводности для минимизации рисков взрыва в системах обработки топлива и топливных баках самолетов.

Полный набор характеристик авиационного топлива описывается в соответствующих стандартах, упомянутых выше.

Наибольший смысл имеет работа с зарубежными стандартами, ввиду того, что практического применения биотоплива в странах Европейского Союза и США происходит уже сегодня. Наиболее используемым топливом в этих государствах является Jet A-1. Кроме того, именно Jet A-1 наиболее часто используется в международных авиаперелётах [29]. К сожалению, действующий стандарт ASTM D1655-15d не распространяется свободно, ввиду чего работа с ним затруднена и требует сторонних источников.

В Таблице 3 представлены описанные выше характеристики наиболее распространённого в зарубежных авиаперевозках топлива Jet A-1 [30].

Таблица 3 – Некоторые технические характеристики топлива Jet A-1

| | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Низшая теплота сгорания | 42.8 МДж/кг |
| Температура начала кристаллизации | -47°C |
| Термоокислительная стабильность | 25 мм Hg при 260°C |
| Вязкость | 8.0 мм ² /с |
| Зольность | 18 мм |

| | |
|---------------------|---------|
| Коррозионность | 24 мг/л |
| Температура вспышки | 38 °С |

Очевидно, что характеристики биотоплива должны отвечать требованиям, предъявляемым различными стандартами, в данном случае, ASTM D1655-15d.

Кроме того, биотопливо должно соответствовать ряду специфичных для него критериев, основным среди которых является возможность замещать обычное реактивное топливо без каких-либо требований к техническим изменениям в конструкции и функционировании воздушного судна, а также в логистической инфраструктуре. (так называемое «drop-in fuel»).

Для проверки соответствия топлива требованиям проводится сертификация, описанная в следующем разделе.

2.4 Сертификация

Как было сказано в предыдущем разделе, наибольшую долю в структуре реактивного топлива, применяемого в международных авиAPERелётах, имеет реактивное топливо Jet A-1, ввиду чего внимание в данной работе акцентируется именно на нём. Тем не менее, при анализе топливных стандартов была установлена высокая степень схожести рассматриваемых показателей, установленных ГОСТ 10227-2013 и ASTM D1655-15d, ввиду чего можно утверждать о теоретической применимости разработанных и апробированных биологических альтернативных топлив на отечественных авиалиниях.

Сертификация реактивных топлив на основе синтезированных углеводородов описывается стандартом ASTM D7566. Он был разработан для обеспечения контроля над синтезированным парафиновым керосином, полученным в результате процесса Фишера-Тропша, и начал действовать в 2009 году [29].

Этот стандарт определяет технические параметры полученного в результате альтернативного процесса топлива, аналогичные описанным выше,

устанавливает дополнительные параметры, которым должно соответствовать биотопливо (максимальная вязкость при -40°C , минимальное содержание ароматических соединений, изнашиваемость оборудования при исследовании смазывающей способности) [14], а также устанавливает допустимый процент смешивания с традиционным топливом.

В Таблице 4 [29] указаны сертифицированные на сегодняшний день по стандарту ASTM D7566 виды альтернативного биологического топлива, а также указаны допустимый процент содержания такого топлива в топливной смеси, а в Таблице 5 [29] приводятся данные о технических характеристиках некоторых видов топлива, одобренных тем же стандартом.

Таблица 4 – Допустимая доля содержания биотоплива в смеси

| Вид топлива | Год сертификации | Допустимый процент содержания в смеси |
|-------------|------------------|---------------------------------------|
| F-T | 2009 | До 50 % |
| HEFA | 2011 | До 50 % |
| SIP | 2014 | До 10 % |
| ATJ | 2016 | До 30 % |

Таблица 5 – Технические характеристики сертифицированного биотоплива

| Характеристика | Значение | | |
|--|------------|---------|---------|
| | F-T и HEFA | SIP | ATJ |
| Теплота сгорания, МДж/кг | 42,8 | | |
| Минимальная температура вспышки, $^{\circ}\text{C}$ | 38 | 100 | 38 |
| Диапазон плотности при 15°C , $\text{кг}/\text{м}^3$ | 730–770 | 765–780 | 755–800 |
| Максимальная температура замерзания, $^{\circ}\text{C}$ | -40 | -60 | -40 |
| Термоокислительная стабильность, мм Hg при 325°C | 25 | | |
| Максимальная вязкость при -40°C , $\text{мм}^2/\text{с}$ | 12,0 | | |

| | |
|---|------|
| Минимальное содержание ароматических соединений , % | 8,4 |
| Максимальный износ при исследовании смазывающей способности, мм | 0,85 |

Смеси, соответствующие описанным в стандарте ASTM D7566 и указанным в Таблицах 4 и 5 требованиям, рассматриваются в авиационном секторе как «drop-in fuels», то есть топлива, применение которых не требует каких-либо изменений в технических системах воздушных судов и в уже существующей инфраструктуре логистики и аэропортов.

Из Таблицы 5 следует важный вывод, что данные виды топлива имеют одинаковое содержание энергии с традиционным авиационным керосином, ввиду чего длительность и дальность полёта воздушного судна не снижается.

Такие топливные смеси, являющиеся альтернативным топливом биологического происхождения, могут беспрепятственно использоваться в гражданской авиации по всему миру. Последствия же их использования будут рассмотрены в Главе 3.

Глава 3. Перспективы и последствия внедрения

В предыдущей главе предполагаемое к использованию биотопливо было рассмотрено с самых разных сторон: были описаны виды сырья, процессы производства, требуемые технические характеристики полученных топливных смесей, а также в общем виде описан процесс сертификации топлива. Таким образом, потенциальное альтернативное топливо готово к использованию.

Тем не менее, стоит учесть ещё один чрезвычайно важный фактор – последствия внедрения и использования такого топлива.

В данной работе приоритетное внимание уделяется именно экологическим последствиям использования альтернативного биологического топлива, тем не менее, социально-экономический аспект также имеет большое значение.

3.1 Экологический аспект

Зачастую беспокойство об окружающей среде проявляется потребителем в связи с непосредственно последствиями использования некоего товара, ввиду чего не учитываются заложенные в этот самый товар воздействия на окружающую среду – например, в случае биотоплива, урожайность, методы выращивания, потребление водных и других ресурсов, транспортировка топлива до конечного потребителя.

Для обеспечения более полного понимания воздействия на окружающую среду и последствий использования того или иного товара, например, биотоплива, следует проводить анализ всего жизненного цикла продукт. Такой подход носит название оценка жизненного цикла (LCA, «Life Cycle Assessment») [30].

Оценка жизненного цикла – сбор информации, сопоставление и оценка входных потоков, выходных потоков, а также возможных воздействий на окружающую среду на всем протяжении жизненного цикла продукции [31].

Таким образом, оценка жизненного цикла биотоплива включает в себя сведения о влиянии выращивания сырья, процессов его переработки, транспортировки до конечного потребителя и выделяющихся загрязняющих веществах в процессе использования.

Согласно ГОСТ Р ИСО 14040-2010, оценка жизненного цикла включает в себя такие стадии, как определение цели и области исследования, инвентаризационный анализ, оценка воздействий и интерпретация.

По своей сути авиационное топливо является компактной формой упаковки энергии, необходимой воздушному судну для осуществления перемещения между двумя условными точками. Для такого перемещения нужно определённое количество энергии, на которое, в зависимости от типа топлива, приходится определённое количество загрязняющих веществ, которые можно привести к эквивалентам массовой единицы CO_2 . Инвертировав такое соотношение, получим удобную единицу для оценки жизненного цикла биотоплива, г CO_2 экв/Мдж.

В Таблице 6 [29, 32, 33, 34, 35, 36, 37] представлены оценки жизненного цикла для разных типов альтернативного биологического топлива.

Методика вычисления данных в значительной степени трудоёмка, ввиду чего в данной работе не рассматривается. Кроме того, получаемые в результате её проведения значения варьируются в довольно широких диапазонах, как и в рамках отдельно взятого исследования, так и от работы к работе. На данный момент не существует эталонного способа оценки жизненного цикла биотоплива, ввиду многофакторности и сложности полного процесса производства и применения биотоплива.

Таблица 6 – Оценка жизненного цикла различных видов биотоплива

| Поколение | Сырьё | Топливо | Оценка жизненного цикла, г CO ₂ экв/Мдж |
|-----------|---------------------------------|---------|---|
| 1 | Сахарный тростник | АТJ | 48,1 |
| | Кукуруза | | 113,8 |
| 2 | Злаки | АТJ | 40,3 |
| | | Ф-Т | от -2 до 17,7 |
| | Отходы кукурузы и лесозаготовки | Ф-Т | от 9 до 13,6 |
| | Соя | HEFA | От 29,9 до 50,8 (в случае вырубki тропических лесов от 90,4 до 600,4) |
| | | | От 20 до 46 |
| | | | От 33 до 40 (до 141 в случае вырубki тропических лесов) |
| Рыжик | | | |
| Ятрофа | | | |
| 3 | Водоросли | HEFA | От 14,1 до 193,2 |

Представленная в Таблице 6 информация позволяет сделать вывод, что практически все рассмотренные в работе виды альтернативного авиационного топлива обеспечивают снижение выбросов парниковых газов по сравнению с таковым у традиционного минерального топлива, чья оценка жизненного цикла составляет ~100 г CO₂ экв/Мдж [21].

Более наглядно данная информация представлена в Рисунке 10.

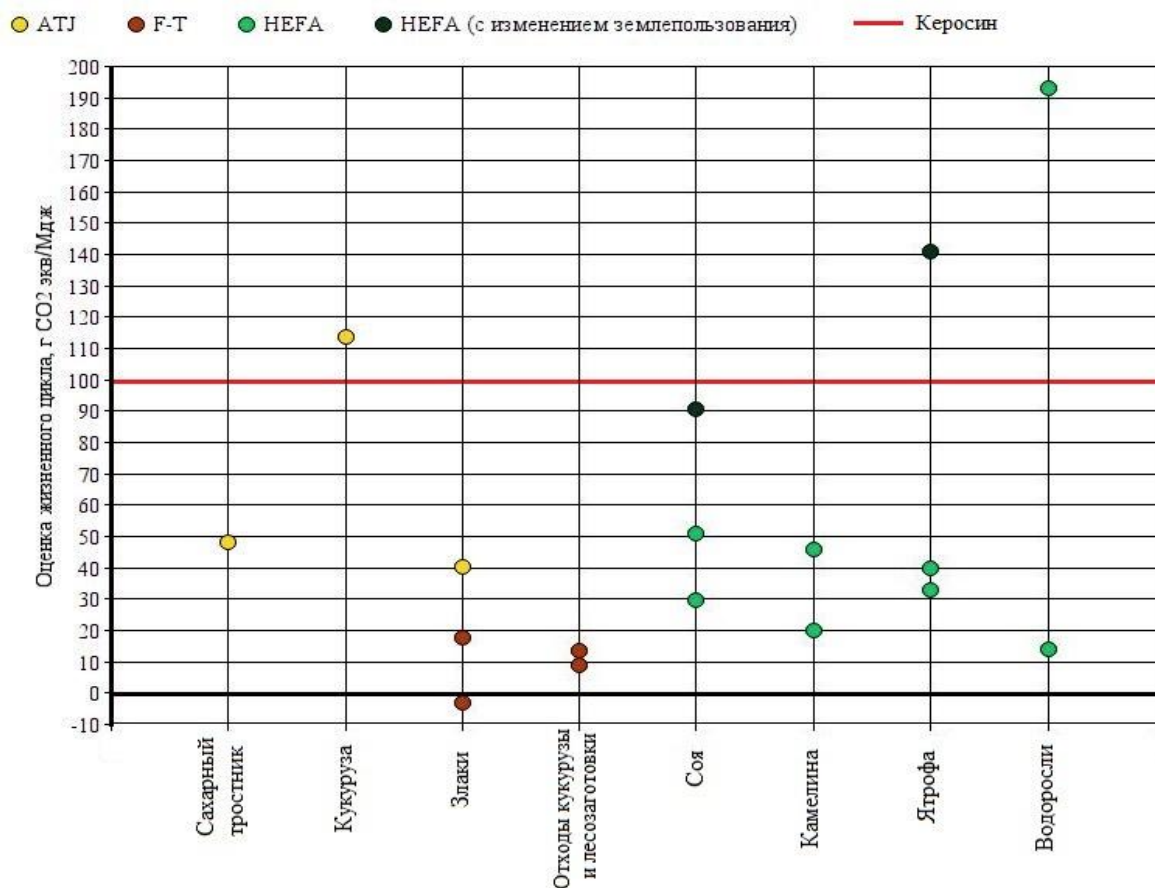


Рисунок 10 – Оценка жизненного цикла различных видов биотоплива

В Рисунке 10 представлены данные, показывающие, что наибольшего внимания в контексте оценки экологических выгод следует уделить устойчивым авиационным топливам 2 и 3 поколений, а именно F-T топливам и произведённым из камелины, ятрофы и водорослей HEFA-топливу.

Произведённые из злаков и отходов сельского хозяйства (лигноцеллюлозы) путём применения процесса Фишера-Тропша топлива имеют минимальные значения выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла, а F-T-топливо из злаков и вовсе имеет отрицательную оценку.

Достоинством такого топлива является и возможность при его создании замкнуть некоторые сельскохозяйственные производственные цепочки в случае использования в качестве сырья отходов лесозаготовки и выращивания

кукурузы, что является важным шагом на пути общего повышения эффективности применения природных ресурсов.

Следует отметить и топливо, полученное в результате липидной конверсии. Имея более высокие оценки выделения парниковых газов в течение жизненного цикла, оно, тем не менее, производится из более устойчивого сырья. Выражается это, главным образом, в возможности выращивать, например, камелину, ятрофу и водоросли на землях, имеющих низкую с точки зрения сельского хозяйства ценность.

В то же время, следует учитывать небольшое количество исследований оценок жизненного цикла для авиационного биотоплива. Как упоминалось ранее, ввиду методологических различий оценка выделения парниковых газов для конкретного вида топлива меняется от исследования к исследованию, что затрудняет сравнение разных топливных смесей. Кроме того, ввиду общей незрелости как технологий производства устойчивого альтернативного топлива, так и методов его оценки, полученные значения имеют тенденцию к определённым изменениям в будущем.

Тем не менее, очевидна возможность снижения выбросов парниковых газов при использовании альтернативных видов топлива биологического происхождения, ввиду чего исследования в области их производства, несомненно, будут продолжаться, что приведёт к более точным оценкам различных их характеристик.

3.2 Экономический аспект

Другим важным аспектом применения авиационного биотоплива является финансовая составляющая. Очевидно, что обеспечивающее максимальное снижение выбросов парниковых газов топливо, скорее всего, не будет применено крупными авиакомпаниями на практике, если экономическая целесообразность данного мероприятия будет сомнительна.

В качестве критерия оценки рентабельности различных видов авиационного топлива удобно использовать стоимость литра такого топлива, данные о которых представлены в Таблице 7 [38].

Таблица 7 – Стоимость различных видов авиационного топлива

| Сырьё | Путь переработки | Стоимость, \$/л |
|---------------------------------|------------------|-----------------|
| Сахарный тростник | АТJ | 1,56-2,76 |
| Кукуруза | | 2,30 |
| Злаки | АТJ | 2,30 |
| | F-T | 1,10 |
| Отходы кукурузы и лесозаготовки | F-T | 1,14-1,96 |
| Камелина и ятрофа | HEFA | 0,80 |
| Соя | | 1,01-1,16 |
| Отработанное масло | | 1,03 |

На момент написания работы средняя цена авиационного керосина Jet A-1 составляла ~85,3 \$/бр [39] или 0,54 \$/л.

Данные Таблицы 7 показывают, что все из рассмотренных в работе видов авиационного топлива серьёзно уступают минеральному в экономическом плане. Так, лишь биотопливо, произведённое путём липидной конверсии масел камелины и ятрофы приблизилось по своим ценовым характеристикам к традиционному керосину.

Более наглядно данная информация представлена в Рисунке 11.

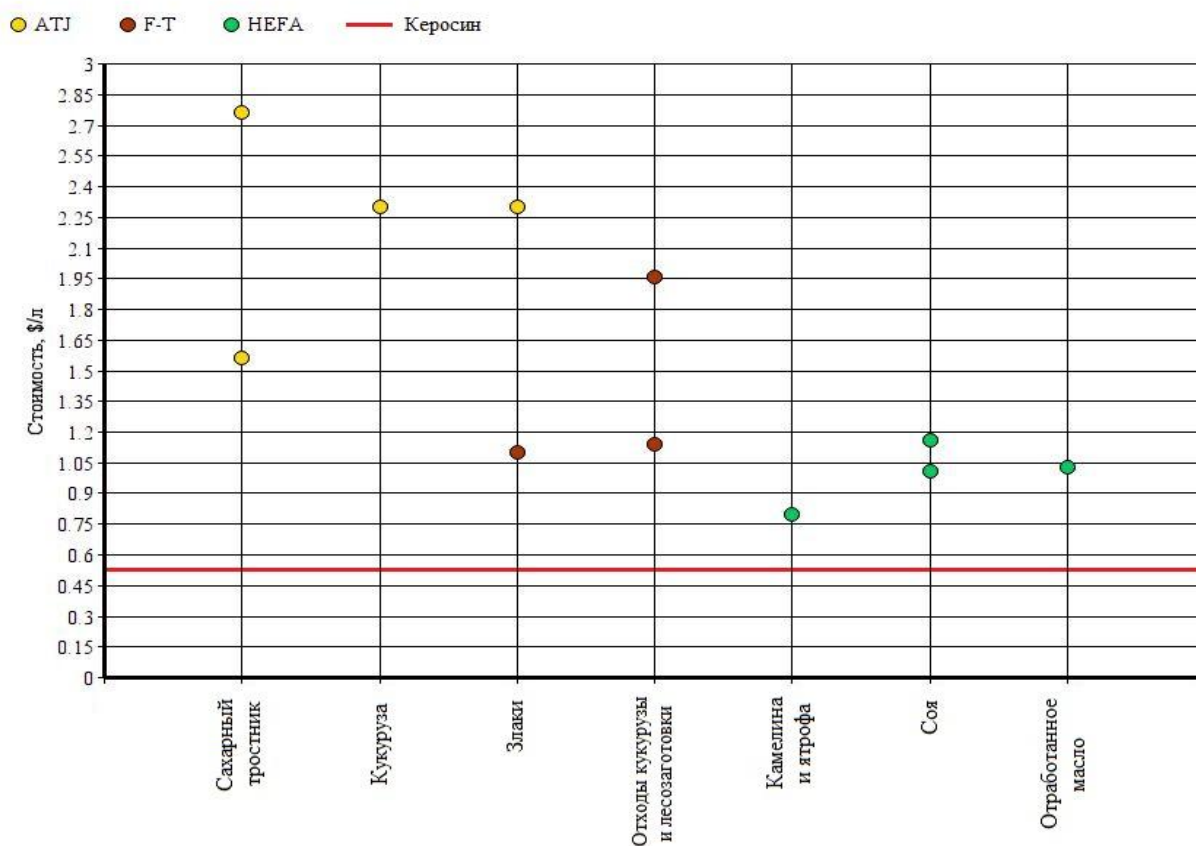


Рисунок 11 – Стоимость различных видов авиационного топлива

Высокая относительная стоимость альтернативного топлива биологического происхождения является серьёзным препятствием на пути его массового внедрения.

Частично эта проблема может быть сглажена возможным подорожанием нефти, однако заинтересованному в биотопливе мировому сообществу необходимо обратить самое пристальное внимание на более надёжные методы решения возникших трудностей – разрабатывать более совершенные методы подготовки сырья и его переработки, а также работать над поддерживающей различными методами законодательной и правовой базы самых разных уровней.

Кроме того, при рассмотрении биотоплива с экономической точки зрения стоит отметить несколько неочевидных моментов.

Так, развитие отрасли производства устойчивого альтернативного топлива способно стать мощным драйвером роста национальной экономики для

самого широкого спектра стран, упрочить положение этих стран на международной арене, увеличить налоговые поступления в бюджет, создать новые рабочие места, помочь более эффективно использовать земельные ресурсы.

Заключение

Потребность быстрого перемещения между разными городами и странами существовала всегда. Выражалась же она в создании всё новых и новых видов транспорта, одним из которых стал воздушный.

Данный вид транспорта является наиболее молодым и динамично развивающимся, что видно из статистических данных ИКАО, представленных ранее. Так, только за последнее десятилетие объём перевезённых авиацией грузов и пассажиров увеличился в ~1,5 раза, что следует из Таблицы 1.

Вместе с объёмом грузоперевозок растёт и влияние воздушного транспорта на окружающую среду, выражающееся в эмиссии парниковых газов в атмосферу. В настоящий момент она составляет порядка 600 Мт CO₂, и способна вырасти в 5 раз уже к 2050 году, что показано в Рисунке 2

Для недопущения реализации такого сценария САЕР был предложен комплекс мер, составляющей которого является применения биотоплива.

В ходе выполнения работы были рассмотрены различные виды альтернативного топлива, среди которых можно выделить АТJ-топливо, производимое из кукурузы, сахарного тростника или злаков, F-T-топливо, получаемое из злаков и отходов лесозаготовки и выращивания кукурузы, и HEFA-топливо, производимое из масличных культур (ятрофа, камелина) и водорослей.

Эти виды биотоплива уже прошли сертификацию, предусмотренную стандартом ASTM D7566, ввиду чего уже сегодня возможно их применение в коммерческих перелётах гражданской авиации в виде топливных смесей. В будущем, вероятно, станет допустимым применение альтернативного топлива и без смешивания с традиционным авиакеросином.

Последствием применения биотоплива является снижение выбросов парниковых газов в атмосферу. Так, в Таблице 6 и Рисунке 10 представлены данные, которые показывают, что многие виды биотоплива способны обеспечить снижение эмиссии углерода. Особого внимания заслуживают F-T-топливо из злаков и лигноцеллюлозы (от -2 до 17,7 и от 9 до 13,6 г CO₂

экв/Мдж, соответственно) и HEFA-топливо из рыжика и ятрофы (от 26 до 46 и от 33 до 40 г CO₂ экв/Мдж, соответственно).

Данные виды биотоплива не только обеспечивают существенное снижение выбросов парниковых газов по сравнению с традиционным топливом (~100 г CO₂ экв/Мдж), но и являются устойчивыми авиационными топливами, то есть не являются потенциальными продуктами питания. Кроме того, такое F-T-топливо способно замыкать производственные циклы, а HEFA-топливо – выращиваться на малоценных для сельского хозяйства землях.

Перспективным является и HEFA-топливо из водорослей, однако несовершенство существующих на данный момент методов производства и оценок не позволяет достаточно точно описать его жизненный цикл (от 14,1 до 193,2 г CO₂ экв/Мдж).

Внимания заслуживает и экономическая сторона использования биотоплива. На сегодняшний день наиболее перспективные с экологической точки зрения виды биотоплива не способны конкурировать в цене с традиционным топливом. В Таблице 7 и Рисунке 11 отражена стоимость различных видов топлива.

Так, стоимость F-T-топлива из злаков и лигноцеллюлозы составляет 1,1 и от 1,14 до 1,96 \$/л, соответственно, а HEFA-топлива из рыжика и ятрофы – 0,8 \$/л против 0,54 \$/л у авиакеросина. Тем не менее, улучшение технологий производства способно несколько снизить стоимость использования биотоплива, однако уже сейчас такая альтернатива находит ограниченное применение в гражданской авиации.

По мнению автора данной работы, биотопливо имеет гигантский потенциал к развитию и расширению сферы своего применения. Продолжение научных исследований в данной области, общественное внимание и государственная поддержка способны превратить его в полноценную замену традиционного авиационного керосина, ввиду чего снизится не только загрязнение окружающей среды воздушным транспортом, но и зависимость человечества от ископаемых видов топлива.

Список использованных источников

1. Воздушный кодекс Российской Федерации [Текст]: федеральный закон: [принят Государственной Думой 2 апреля 1999 г.: одобрен Советом Федерации 22 апреля 1999 г.].
2. Статистические данные о результатах деятельности воздушного транспорта в 2017 году / Международная организация гражданской авиации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.icao.int/annual-report-2017/Pages/RU/the-world-of-air-transport-in-2017-statistical-results.aspx> (Дата обращения: 21.04.2019)
3. Об охране атмосферного воздуха [Текст]: федеральный закон: [принят Государственной Думой 2 апреля 1999 г.: одобрен Советом Федерации 22 апреля 1999 г.]. – (Актуальный закон).
4. Мировая транспортная система и логистика: основные направления развития / Научная электронная библиотека «Киберленинка» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mirovaya-transportnaya-sistema-osnovnye-napravleniya-razvitiya> (Дата обращения: 21.04.2019)
5. International Air Transport Association. IATA 2015 Report on Alternative Fuels [Текст] / IATA, 2015. – 62 с.
6. Air Transport Action Group. Beginner's guide to Sustainable Aviation Fuel [Текст] / ATAG, 2017. – 24 с.
7. Schäfer, A.W. The Prospects for Biofuels in Aviation [Текст] / A.W. Schäfer. – University College London, 2016. – 14 с.
8. Гуров, В.И. 27 Лет первому полёту самолета с водородным двигателем [Текст]: научно-технический журнал / Двигатель, 2013, № 5(89) 2013 г.
9. International Air Transport Association. Fact Sheet. Climate Change & CORSIA [Текст] / IATA, 2018. – 2 с.

10. Wang, W. Review of Biojet Fuel conversion Technologies [Текст]: технический отчёт / W. Wang, L. Tao, J. Markham, Y. Zhang, E. Tan, L. Batan, E. Warner, M. Biddu. – National Renewable Energy Laboratory, 2016. – 98 с.
11. Chuck, C.J. Feedstocks for Aviation Biofuels. [Текст] / C.J. Chuck, M. McManus, M.J. Allen, S. Singh. – University of Bath, 2016. – 18 с.
12. Cotrez, L.A. Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil: A flightpath to aviation biofuels in Brazil [Текст] / L.A. Cortez, F.E. Nigro, A.M. Nassar, H. Cantarella, L.A. Nogueira, M.A. de Moraes, R.L. Leal, T.T. Franco, U. Schuchardt. – Editora Edgard Blücher Ltda, 2014. – 272 с.
13. El Takriti, S. Mitigating international aviation emissions: Risks and opportunities for alternative jet fuels [Текст] / S. El Takriti, N. Pavlenko, S. Searle. – International Council on Clean Transportation, 2017. – 36 с.
14. International Air Transport Association. IATA 2014 Report on Alternative Fuels [Текст] / IATA, 2014. – 68 с.
15. Jatropha Curcas Seeds Buy Online in India / Shop for Plants Online in India [Электронный ресурс] <https://www.chhajedgarden.com/jatropha-curcas-seeds.html> (Дата обращения: 21.04.2019)
16. Фото РЫЖИК Посевой / Галерея картинок [Электронный ресурс] <http://m1r.su/foto-ryzhik-posevnoj.html> (Дата обращения: 21.04.2019)
17. Bauen, A. Review of the potential for biofuels in aviation [Текст] / A. Bauen, J. Howes, L. Bertuccioli, C. Chudziak. – E4tech, 2009. – 117 с.
18. Algae for the sustainable energy production and waste management / The Green Shadow [Электронный ресурс] <http://www.thegreenshadow.com/2013/10/algae-for-sustainable-energy-production.html> (Дата обращения: 21.04.2019)
19. Ecoduna to Improve Algae Production with SCHOTT Glass Components / SCHOTT [Электронный ресурс]. – <https://www.schott.com/english/news/press.html?NID=com4854> (Дата обращения: 21.04.2019)

20. Брожение / XuMuK.ru – сайт о химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/626.html> (Дата обращения: 21.04.2019).
21. Brooks, K.P. Low-Carbon Aviation Fuel Through the Alcohol to Jet Pathway [Текст] / K.P. Brooks, L.J. Snowden-Swan, S.B. Jones, M.G. Butcher, G.-S.J. Lee, D.M. Anderson, J.G. Frye, J.E. Holladay, J. Owen, L. Harmon, F. Burton, I. Palou-Rivera, J. Plaza, R. Handler, D. Shonnard. – Pacific Northwest National Laboratory, 2016. – 42 с.
22. Дегидратация / XuMuK.ru – сайт о химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1186.html> (Дата обращения: 21.04.2019).
23. Олигомеры / XuMuK.ru – сайт о химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3097.html> (Дата обращения: 21.04.2019).
24. Гидроочистка / XuMuK.ru – сайт о химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1052.html> (Дата обращения: 21.04.2019).
25. De Klerk, A. Aviation Turbine Fuels Through the Fischer–Tropsch Process [Текст] / A. de Klerk. – University of Alberta, 2016. – 19 с.
26. Фишера-Тропша синтез / XuMuK.ru – сайт о химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/4779.html> (Дата обращения: 21.04.2019).
27. ГОСТ 32595-2013. Топливо авиационное для газотурбинных двигателей Джет А-1 (JET A-1). Технические условия [Текст]. – Введ. 2015-01-01. – ОАО "Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке нефти".
28. ГОСТ 10227-2013. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия [Текст]. – Введ. 2015-01-01. – Межгосударственный технический комитет по стандартизации.

29. Dorrington, G.E. Certification and Performance [Текст] / G.E. Dorrington. – Royal Melbourne Institute of Technology, 2016. – 19 с.
30. Capaz, R.S. Life Cycle Assessment of Biojet Fuels [Текст] / R.S. Capaz, J.E.A. Seabra. – Universidade Estadual de Campinas, 2016. – 16 с.
31. ГОСТ Р ИСО 14040-2010. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура [Текст]. – Введ. 2010-06-01. – Научно-технический центр "ИНТЕК".
32. O'Connell, A. Considerations on GHG emissions and energy balances of promising aviation biofuel pathways [Текст] / A. O'Connell, M. Kousoulidou, L. Lonza, W. Weindorf. – Elsevier, 2019. – 12 с.
33. Wong, H.M. Life-cycle assessment of greenhouse gas emissions from alternative jet fuels [Текст] / H. M. Wong. – Massachusetts Institute of Technology, 2008. – 148 с.
34. Ou, X. Life-Cycle Energy Use and Greenhouse Gas Emissions Analysis for Bio-Liquid Jet Fuel from Open Pond-Based Micro-Algae under China Conditions [Текст] / X. Ou, X. Yan, X. Zhang, X. Zhang. – China Automotive Energy Research Center, 2013. – 28 с.
35. Moser, B.R. Camelina (*Camelina sativa* L.) oil as a biofuels feedstock: Golden opportunity or false hope? [Текст] / B. R. Moser. – Wiley-VCH, 2010. – 22 с.
36. De Jong, S. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production [Текст] / S. de Jong, K. Antonissen, R. Hoefnagels, L. Lonza, M. Wang, A. Faaji, M. Junginger. – Biotechnology for Biofuels, 2017. – 18 с.
37. Stratton, R.W. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Alternative Jet Fuels [Текст] / R.W. Stratton, H.M. Wong, J.I. Hileman – Massachusetts Institute of Technology, 2010. – 153 с.
38. International Civil Aviation Organization. Sustainable Aviation Fuels Guide [Текст] / ICAO, 2017. – 65 с.
39. Jet Fuel Price Monitor / International Air Transport Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.iata.org/publications/economics/fuel-monitor/Pages/index.aspx> (Дата обращения: 23.04.2019).