

На правах рукописи



КОЖЕВНИКОВ ВИТАЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА НЕФТИ ЗА СЧЕТ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТРАБОТАННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ
В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре Энергетики высокотемпературной технологии (ЭВТ) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»).

Научный руководитель:

Попов Станислав Константинович

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры Инновационных
технологий наукоемких отраслей
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты:

Лукин Сергей Владимирович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Теплоэнергетики
и теплотехники ФГБОУ ВО
«Череповецкий государственный
университет»

Колибаба Ольга Борисовна

кандидат технических наук, доцент,
заведующая кафедрой Энергетики
теплотехнологий и газоснабжения
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
энергетический университет
им. В.И. Ленина»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Объединенный
институт высоких температур Российской
академии наук»

Защита диссертации состоится 23 декабря 2021 г. в 15 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.021 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, дом 17, ауд. Г-406.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, Ученый Совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

МЭИ.021, д.т.н.



Терешин Алексей Германович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В России ежегодно добывается 480 – 560 млн. тонн нефти, из которых половина поставляется на экспорт и столько же на внутренний рынок, на переработку. Транспортирование нефти до потребителей производится в основном по магистральным трубопроводам.

Технологическая система транспорта нефти и нефтепродуктов (СТН) в России характеризуется разветвленностью (свыше 69 тыс. км магистральных трубопроводов), множественностью и рассредоточенностью объектов – элементов этой системы. В частности, в СТН входят нефтеперекачивающие станции (более 500 ед.), крупные резервуары хранения (более 1600 шт. емкостью от 10 до 100 тыс. м³), терминалы перевалки и налива нефти и нефтепродуктов железнодорожного и морского сообщения. В состав СТН входят заводы, строительные и ремонтные подразделения, объекты электро-, тепло- и водоснабжения, производственно-технические базы, научно-проектные организации, транспортные и административно-хозяйственные службы и др.

Функционирование СТН сопровождается образованием отработанных нефтепродуктов (ОНП). В соответствии с ГОСТ 26098-84 к ОНП относятся: отработанные масла, промывочные нефтяные жидкости, а также смеси нефти и нефтепродуктов, образующиеся при зачистке средств хранения, транспортирования, извлекаемые из нефтесодержащих вод.

Отработанные нефтепродукты в России представляют из себя материальный поток, образующийся в технологической системе транспорта нефти и нефтепродуктов, который характеризуется множественностью разнородных составляющих (отработанные масла, нефтешламы, некондиционные жидкие нефтепродукты и др.) и распределенностью источников этих составляющих практически по всей территории страны. Утилизация данного потока может быть реализована с соблюдением экологических нормативов и получением энергосберегающего эффекта путем использования отработанных нефтепродуктов как топлива.

Энергосберегающий эффект может быть достигнут посредством использования теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах как замещающих энергогенерирующих установок. Такое использование возможно в системах теплоснабжения, горячего водоснабжения, автономного обогрева, в других объектах промышленной теплоэнергетики.

Необходимость и востребованность исследований в направлении энергоэффективного и экологически безопасного использования отработанных нефтепродуктов как топлива обуславливает актуальность данной работы.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в исследование вопросов эффективности и экологичности использования отработанных нефтепродуктов как топливно-энергетического ресурса внесли сотрудники НИУ «МЭИ» Э.П. Волков, П.В.

Росляков, Б.С. Белосельский, В.Н. Покровский, В.И. Волков, В.А. Ипполитов, В.И. Кормилицын. Значимые результаты в области исследования состава и свойств отработанных нефтепродуктов представлены в работах Jesse C. Jones, Timothy T. Maxwell, Raghu Narayan, Atila Ertas (США); V. Pelitli, Ö. Doğan, H. J. Köroğlu (Турция). Исследования высокотоксичных продуктов сгорания отработанных масел проводили Е.С. Бродский, Н.А. Ключев, М.Г. Коротков в Институте проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (Москва); М.Н. Бернадинер, А.П. Шурыгин, И.М. Бернадинер (НИУ «МЭИ»); W. Marcus Cooke и Rachael L. Barbour из Лаборатории Баттеля (США); Catherine Jarvis, Diane Albrinck, George Schewe, Leslie Joseph Ungers, Paul D. Moskowitz из Национальной лаборатории Айдахо (США). Исследование антропогенного воздействия на окружающую среду при использовании в качестве топлива углеводородсодержащих отходов выполнено РУП «БелНИЦ «Экология» под руководством В.В. Ходина и В.С. Зубрицкого (Республика Беларусь). Масштабные исследования в сферах обращения отработанных нефтепродуктов, применения топливосжигающего оборудования, процессов сжигания отработанных нефтепродуктов в качестве котельно-печного топлива и антропогенного воздействия были организованы агентствами по охране окружающей среды США, Австралии, Великобритании, Германии и других стран. Вместе с тем в технической, нормативной и научной литературе недостаточно представлены связи теплофизических характеристик такого вида топлива с составом загрязнителей, условия экологической безопасности процессов сжигания, энергетическая эффективность применения специализированных теплогенераторов в схемах теплоснабжения и смежных технологиях с целью достижения максимального ресурсосберегающего эффекта и сокращения количества углеводородсодержащих отходов.

Цель работы заключается в повышении эффективности функционирования системы транспорта нефти на основе энергоэффективного и экологически безопасного использования отработанных нефтепродуктов как источника энергии в объектах промышленной теплоэнергетики, входящих в данную или смежные системы.

Задачи, решаемые для достижения намеченной цели:

- 1) анализ свойств отработанных нефтепродуктов для оценки перспектив их энергоэффективного использования в качестве топлива;
- 2) разработка и экспериментальное исследование горелочного устройства с целью изучения процесса горения отработанных нефтепродуктов;
- 3) исследование вариантов энергоэффективного использования отработанных нефтепродуктов как источника энергии в системах теплоснабжения;
- 4) исследование условий экологически эффективного сжигания отработанных нефтепродуктов в промышленных установках.

Научная новизна работы

1. Впервые для современных теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах установлена связь между концентрацией галогенов в топливе

$c_{\text{гал}}$, ppm, и тепловой мощностью Q , МВт, описываемая уравнением $c_{\text{гал}} Q = K_Q$, где нормативный коэффициент $K_Q = 600 \text{ ppm} \cdot \text{МВт}$.

2. Впервые выявлены и аналитически описаны связи между вязкостью и теплотой сгорания топлива из отработанных нефтепродуктов.

3. Впервые определена и аналитически описана граница области экологически эффективного сжигания отработанных нефтепродуктов с обезвреживанием содержащихся в них галогенов и полихлорированных бифенилов для испарительной и распылительной технологий сжигания.

4. Разработана методика оценки энергосберегающего эффекта использования теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах в системе теплоснабжения.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Сформулированы рекомендации по выбору мощности теплогенератора в зависимости от концентрации галогенов в топливе из отработанных нефтепродуктов. По мере совершенствования технологии очистки и сжигания отработанных нефтепродуктов, разработки более эффективных теплогенераторов значение нормативного коэффициента K_Q должно подлежать пересмотру в сторону его уменьшения, что будет отражать рост экологичности теплогенераторов.

2. Основываясь на практике хранения ОНП как топлива с нормируемым содержанием галогенов, получена зависимость, описывающая связь между концентрацией галогенов $c_{\text{гал}}$, ppm, и массой M , т, для единовременного хранения ОНП в резервуаре: $K_M = c_{\text{гал}} M$. Установленное значение нормативного коэффициента $K_M = 10\,000 \text{ ppm} \cdot \text{т}$ рекомендуется использовать в инженерной практике при создании объектов промышленной теплоэнергетики, использующих ОНП как топливо.

3. Результаты разработки и исследования испарительного горелочного устройства, рекомендации по использованию отработанных нефтепродуктов как топлива могут быть использованы в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях при повышении уровня энергосбережения и экологической эффективности объектов промышленной теплоэнергетики, а также при разработке нормативных документов по использованию ОНП как топлива.

4. Научные и практические результаты работы могут быть использованы в учебном процессе в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при подготовке бакалавров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», магистров по программам «Энергетика теплотехнологии», «Энергообеспечение предприятий. Высокотемпературные процессы и установки».

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования состава, теплофизических и теплотехнических свойств отработанных нефтепродуктов.

2. Результаты экспериментального исследования процесса сжигания отработанных нефтепродуктов в испарительном горелочном устройстве.

3. Результаты исследования зависимости допустимой тепловой мощности теплогенератора на отработанных нефтепродуктах от концентрации галогенов в топливе.

4. Результаты исследования границы области экологически эффективного сжигания отработанных нефтепродуктов с обезвреживанием содержащихся в них галогенов и полихлорированных бифенилов для испарительной и распылительной технологий сжигания.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы физического моделирования, экспериментального исследования, методы обработки экспериментальных данных.

Достоверность и обоснованность полученных результатов исследований обеспечиваются анализом патентной информации по существующим техническим решениям, патентной проверкой и защитой вновь разработанных, оригинальность которых подтверждена патентом на изобретение; постановкой, проведением и использованием результатов теплотехнических испытаний; удовлетворительными результатами сопоставления полученных в работе данных с результатами исследований других авторов. Исследования проводились с применением поверенных сертифицированных приборов и аттестованного лабораторного оборудования.

Апробация результатов

Основные результаты работы доложены и обсуждены на: III Международной конференции «Альтернативные источники энергии для больших городов» (Москва, 2008 г.); XXVI, XXVII Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2020, 2021 гг.); на XV Всероссийской (VII Международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2020» (Иваново, 2020 г.); на V Международной научно-технической конференции «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла» (Москва, 2020 г.).

Публикации. Основные научные положения и выводы диссертационной работы изложены в 19 опубликованных работах, в том числе 4 публикации – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 1 публикация – в издании, индексируемом в международной базе Scopus.

Структура и объём работы. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список используемых источников. Общий объём составляет 137 страниц, включая 34 рисунка, 33 таблицы и список использованных источников из 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цели и задачи, оценена степень разработанности темы исследования, отмечена научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы применяемые методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту; обоснована степень достоверности полученных результатов; приведены сведения об апробации результатов исследования и личном вкладе автора диссертации.

В первой главе выполнен анализ свойств отработанных нефтепродуктов для оценки перспектив их энергоэффективного использования в качестве топлива.

Анализ мировой практики обращения ОНП позволяет выделить основные направления их использования:

- регенерация с целью восстановления нормативных характеристик нефтепродуктов для последующего использования по первичному назначению;
- вторичное использование в оборудовании и технологиях не по первичному назначению в качестве альтернативного материального ресурса;
- переработка с целью получения новых нефтепродуктов;
- использование в качестве котельно-печного топлива.

В условиях функционирования объектов СТН в России приоритетным направлением использования ОНП является сжигание в качестве котельно-печного топлива и топливных компонентов в смежных технологиях с получением энергосберегающего эффекта.

Для определения соответствия ОНП как топлива установленным требованиям и реализации качественного сжигания ОНП необходимо знание таких характеристик, как состав, температура вспышки, вязкость, теплота сгорания. С целью сбора и анализа упомянутых характеристик автором изучены информационные материалы СТН за 15 лет, из которых отобрано более 300 паспортов и протоколов испытаний всех отработанных нефтепродуктов. На этой основе, в частности, определен укрупненный состав некоторых видов ОНП (таблица 1).

Таблица 1 – Укрупненный состав ОНП

Вид ОНП	Состав ОНП, мас. %		
	углеводороды	вода	механические примеси
Отработанные масла	78,0 – 99,37	0,14 – 5,4	0,00637 – 8,74
Нефтешламы	35,16 – 64,7	20,4 – 60,9	3,95 – 14,9
Некондиционное дизельное топливо	96,33	3,40	0,27

Результаты исследований позволяют выделить группы очищенных ОНП, характеристики которых могут соответствовать требованиям к топливам как энергетическому ресурсу. К таковым относятся: отработанные масла; некондиционные нефтепродукты разного назначения, в том числе моторные

топлива и масла, утратившие свои потребительские характеристики; горючие фракции жидких нефтешламов, образующиеся при очистке резервуаров, трубопроводов и механо-технологического оборудования; использованные промывочные и специальные жидкости на нефтяной основе и синтетических углеводородах, растворители, олифы; горючая фаза жидких отходов нефтепродуктов, образовавшихся на автозаправочных станциях; горючая фаза отстоянных льяльных вод судов и танкеров (всплывшие нефтепродукты). Перечисленные ОНП имеют диапазон вязкости от 1,4 до 400 сСт при 50 °С.

Предварительный анализ показал возможность использования очищенных ОНП с низшей теплотой сгорания в диапазоне между 40,5 – 43,5 МДж/кг и температурой вспышки не менее 38 °С. Объем очищенных ОНП, удовлетворяющий этому диапазону теплоты сгорания, оценивается свыше 1000 т в год, что может обеспечить заметный энергосберегающий эффект.

Для продолжения исследований в условиях, обеспечивающих единообразие процедур и способов сжигания ОНП как топлива, необходимо подобрать или разработать горелочное устройство, которое позволит изучить процессы горения и продукты сгорания ОНП в широком диапазоне вязкости.

Во второй главе изложены результаты разработки и экспериментального исследования горелочного устройства для сжигания отработанных нефтепродуктов.

Для максимально полного и безопасного сжигания ОНП, содержащих галогеносодержащие соединения и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), технологии сжигания ОНП должны обеспечить: температуру факела от 1200 до 1400 °С; достаточный избыток кислорода; длительность пребывания органических компонентов в объеме факела около 2 секунд.

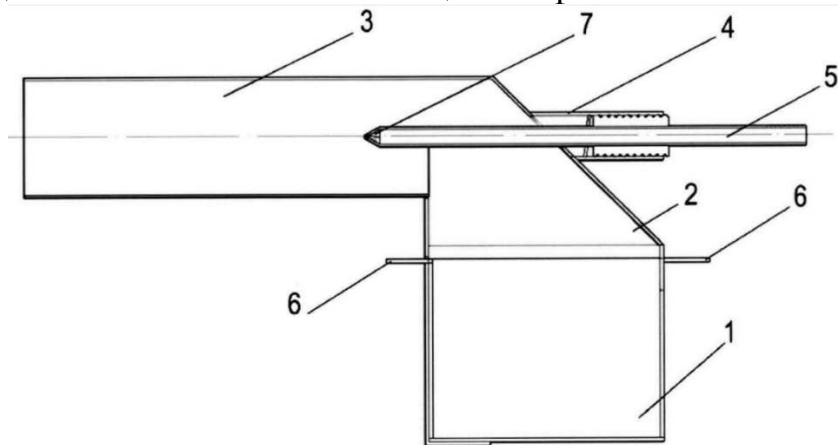
В международной практике используется шкала цветов факела для визуального контроля горения жидких углеводородных топлив (при содержании С+Н в сумме не менее 99%), представленная в таблице 2.

Таблица 2 – Шкала для визуального контроля температуры факела

Цвет факела	Температура факела, °С
Dark red (темно-красный)	525
Dull red (тускло-красный)	700
Dull cherry red (тусклый вишнево-красный)	800
Full cherry red (насыщенный вишнево-красный)	900
Clear cherry red (ясный вишнево-красный)	1000
Deep orange (темно-оранжевый)	1100
White (белый)	1300
Bright White (яркий белый)	1400
Dazzling White (ослепительно белый)	1500

При повышении температуры в диапазоне от 1100 до 1300 °С цвет факела светлеет от оранжевого к соломенному и желто-белому. В диапазоне температур от 1200 до 1400 °С цвет факела изменяется от желтого до ярко белого соответственно. Из сопоставления рекомендованных температур факела

с цветовой шкалой следует, что горелочное устройство должно обеспечить горение ОНП в диапазоне желтых и белых цветов факела.



1 – топливная емкость; 2 – испарительная камера; 3 – труба-дожигатель;
4 – втулка регулирования положения воздушной фурмы; 5 – воздушная фурма;
6 – рукоятки топливной емкости; 7 – сопло воздушной фурмы

Рисунок 1 – Конструктивная схема горелочного устройства

Горелочные устройства, работающие на жидком топливе, принято разделять на два типа: распылительные и испарительные. Поиск технического решения задачи, включающий экспериментальную апробацию ряда конструктивных вариантов, привел к созданию испарительного горелочного устройства (рисунок 1), в котором последовательно реализуются две стадии: (1) испарение и конверсия жидкого топлива с недостатком воздуха; (2) воспламенение и полное сгорание образовавшейся газообразной фазы (продуктов конверсии) с избытком воздуха. Устройство снабжено дожигателем 3 со встроенной фурмой 5 подачи вторичного воздуха от компрессора. Первичный воздух поступает в регулируемый зазор между топливной емкостью 6 и корпусом испарительной камеры 2. Зазор регулируется перемещением топливной емкости в направлении, параллельном оси фурмы.

Контроль качества сжигания осуществлялся по составу продуктов горения. Температура факела определялась с использованием шкалы (таблица 2).

Создание горелочного устройства обеспечило возможность изучения топливных характеристик ОНП, факелов и продуктов их сгорания, позволило выявить линейку ОНП и смесей с ОНП, пригодных для использования в качестве топлива в котельно-печном оборудовании и других объектах промышленной теплоэнергетики.

Выполнено исследование процесса воспламенения и горения ряда отработанных нефтепродуктов. Для розжига некоторых ОНП использовалось некондиционное дизельное топливо, которое расходовалось на покрытие поверхности ОНП в топливной емкости слоем толщиной 1–2 мм.

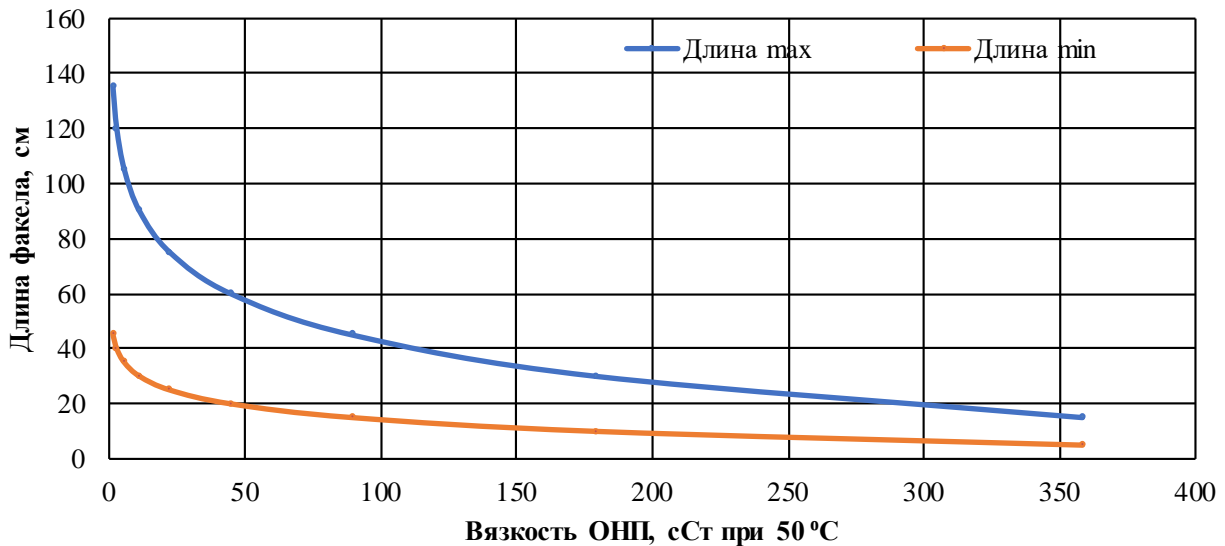


Рисунок 2 – Зависимость длины факела от вязкости ОНП

На рисунке 2 представлена зависимость длины факела при сжигании ОНП от их вязкости, полученная в результате испытаний разработанного горелочного устройства. Максимальная длина факела (верхняя кривая на рисунке 2) получена при избыточном давлении вторичного воздуха до 2 атм, а минимальная длина (нижняя кривая на рисунке 2) – при 0,1 атм. Длина факела увеличивается со снижением вязкости. Можно предположить следующий механизм процесса, объясняющий данный результат. Со снижением вязкости интенсифицируется свободно-конвективный массоперенос в топливной емкости, что способствует интенсификации испарения топлива и образованию газовой фазы. Это вызывает необходимость увеличения расхода вторичного воздуха через фурму и в итоге приводит к росту длины факела.

Определено, что в разработанном горелочном устройстве целесообразно сжигать ОНП и их смеси с вязкостью до 110 сСт при 50 °С. Сжигание более вязких ОНП в данном устройстве возможно, но характеристики пульсирующего факела и отходящих газов не стабильны.

Экспериментальные исследования испарительного горелочного устройства, выполненные для широкой номенклатуры ОНП, подтвердили его работоспособность, а также возможность обеспечения должного температурного уровня и времени пребывания в факеле.

В результате экспериментов выделен ряд ОНП, при сжигании которых развивается необходимая температура факела, а массовая доля несгоревшего твердого остатка в топливной емкости, коррелируемая с коксуемостью, не превышает 6 %. Данная величина соответствует коксуемости флотских мазутов Ф-5 и Ф-12, равной 6 % по ГОСТ 10585-99. При коксуемости свыше 6 % наблюдался черный дым – явный признак неполного горения.

В таблице 3 представлены результаты испытаний горелочного устройства в рабочем режиме на желтовато-белых и ярко-белых факелах.

Таблица 3 – Характеристики процесса горения ОНП в рабочем режиме горелочного устройства

№	Вид ОНП	Тип значения	Содержание компонента в отходящих газах			
			NO _x , ppm	CO, ppm	CH ₄ , %	SO ₂ , ppm
1	Моторное дизельное топливо	среднее	24,2	46,5	0,025	109,7
		максимум	34,6	50	0,06	298
2	Моторное отработанное масло	среднее	21,1	17,3	0,16	8,3
		максимум	38	34	0,2	26
3	Гидравлическое отработанное масло	среднее	15,5	15,3	0,097	25,7
		максимум	31	32	0,11	87
4	Турбинное отработанное масло	среднее	12,3	24,3	0,1	4
		максимум	20	59	0,1	7
5	Трансмиссионное отработанное масло	среднее	14,7	67,7	0,05	85,5
		максимум	24	173	0,1	254
6	Смесь отработанных масел	среднее	19,9	35,3	0,017	51,7
		максимум	32	59	0,02	97
7	Осадочная нефть с добавкой дизельного топлива	среднее	7,2	92,2	0,01	39,7
		максимум	9,8	218	0,02	83
8	Нефтяная пленка с добавкой дизельного топлива	среднее	4,7	103,5	0,05	17,3
		максимум	7	251	0,1	26

Анализ состава продуктов горения приводит к выводу, что разработанное испарительное горелочное устройство обеспечивает поддержание концентрации NO_x и CO при сжигании ряда ОНП на более низком уровне, чем при сжигании дизельного топлива, которое в данном исследовании использовано как эталон, мера для оценочного сравнения.

Исследованное горелочное устройство обеспечивает при сжигании ОНП соблюдение экологических требований отечественных стандартов по содержанию вредных компонентов в составе продуктов горения. Испарительная технология, использованная в конструкции устройства, дает возможность управлять концентрациями загрязняющих веществ в широком диапазоне, снижая до нуля выход CO при низком уровне выхода оксидов азота.

В экспериментах достигалась мощность горелки 45 кВт. Помимо решения исследовательских задач, горелка может быть использована на объектах промышленной теплоэнергетики для сжигания небольших количеств ОНП на месте их образования.

В третьей главе представлены результаты исследования условий энергоэффективного использования отработанных нефтепродуктов как источника энергии в системах теплоснабжения и других объектах промышленной теплоэнергетики.

Энергосберегающий эффект при сжигании ОНП может быть достигнут посредством использования теплогенераторов на ОНП как замещающих энергогенерирующих установок. Такое использование возможно в системах

теплоснабжения, горячего водоснабжения, автономного обогрева или в технологических установках.

Анализ зарубежных и отечественных данных по теплотехническим и экологическим параметрам теплогенераторов на жидком топливе и ОНП позволил впервые установить связь между концентрацией галогенов в топливе $c_{\text{гал}}$, ppm, и тепловой мощностью Q , МВт, описываемую уравнением

$$c_{\text{гал}} Q = K_Q,$$

где нормативный коэффициент $K_Q = 600 \text{ ppm} \cdot \text{МВт}$. Данный коэффициент можно рассматривать как меру достаточной экологичности эффективности теплогенератора (источника выбросов). На этом основании сформулированы рекомендации по выбору мощности теплогенератора в зависимости от концентрации галогенов в топливе из ОНП (рисунок 3).

По мере совершенствования технологий очистки и сжигания ОНП, разработки более эффективных теплогенераторов величина нормативного коэффициента K_Q должна подлежать пересмотру в сторону его уменьшения, что будет отражать рост экологичности теплогенератора.

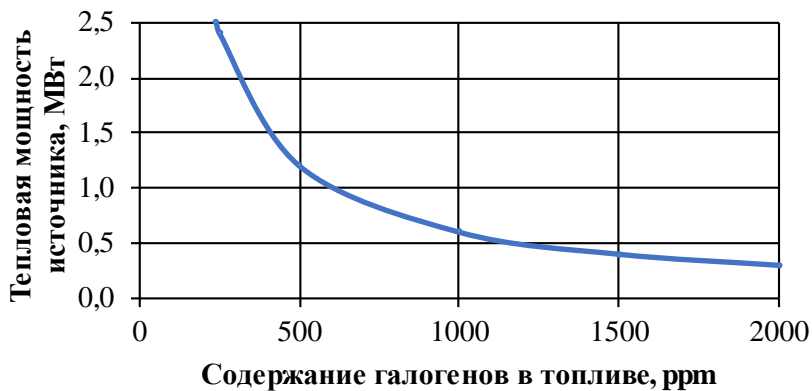


Рисунок 3 –
Зависимость тепловой мощности источника от содержания галогенов в топливе из ОНП

Исследованы условия экологически безопасного хранения отработанных нефтепродуктов. Получена зависимость, описывающая связь между концентрацией галогенов $c_{\text{гал}}$, ppm, и массой M , т, для единовременного хранения ОНП в резервуаре: $K_M = c_{\text{гал}} M$.

Таблица 4 – Нормируемый ряд объемов единовременного хранения ОНП как топлива

Наименование параметра	Значение параметра				
	1000	500	250	125	50
Максимальное содержание галогенов в ОНП, ppm	1000	500	250	125	50
Допустимая масса единовременного хранения ОНП, т	10	20	40	80	200
Допустимый объем резервуаров* хранения ОНП, м ³	15	30	60	120	300

*- объем резервуаров для единовременного хранения ОНП рассчитан из соотношения не более 1,5 м³ на 1 тонну нефтяного топлива.

Установленное значение нормативного коэффициента $K_M = 10\,000$ ppm·т рекомендуется использовать в инженерной практике при создании объектов промышленной теплоэнергетики, использующих ОНП как топливо. Соответствующий нормируемый ряд представлен в таблице 4 и на рисунке 4.

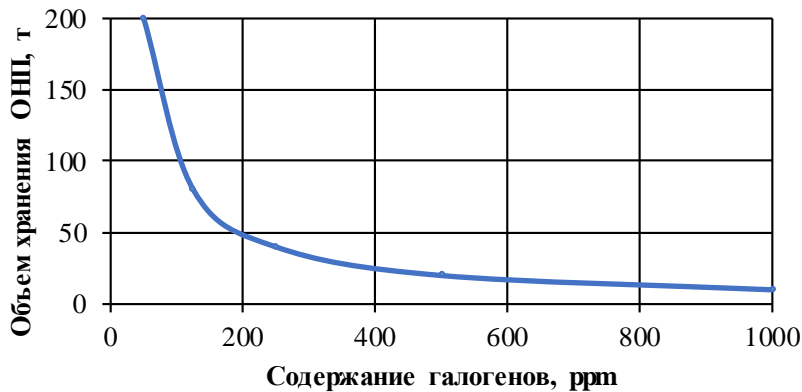


Рисунок 4 –
Зависимость
допустимого объема
единовременного
хранения ОНП как
топлива от содержания
галогенов

Разработана методика оценки энергосберегающего эффекта использования теплогенераторов на ОНП в системе теплоснабжения. В методике рассмотрены три варианта подключения в систему теплогенератора на ОНП. Использование методики состоит в определении принадлежности анализируемого варианта к одному из тех, что рассмотрены в методике, и расчете экономии топлива в централизованном источнике теплоснабжения.

Варианты подключения теплогенератора (ТГ) на ОНП в систему теплоснабжения представлены на рисунке 5.

Исходным является вариант 1 без ТГ. Вариант 2: теплогенератор на ОНП подключается в месте размещения источника И, при этом $Q_{\text{пот.2}} = Q_{\text{пот.1}}$. Экономия топлива в И в пересчете на условное топливо

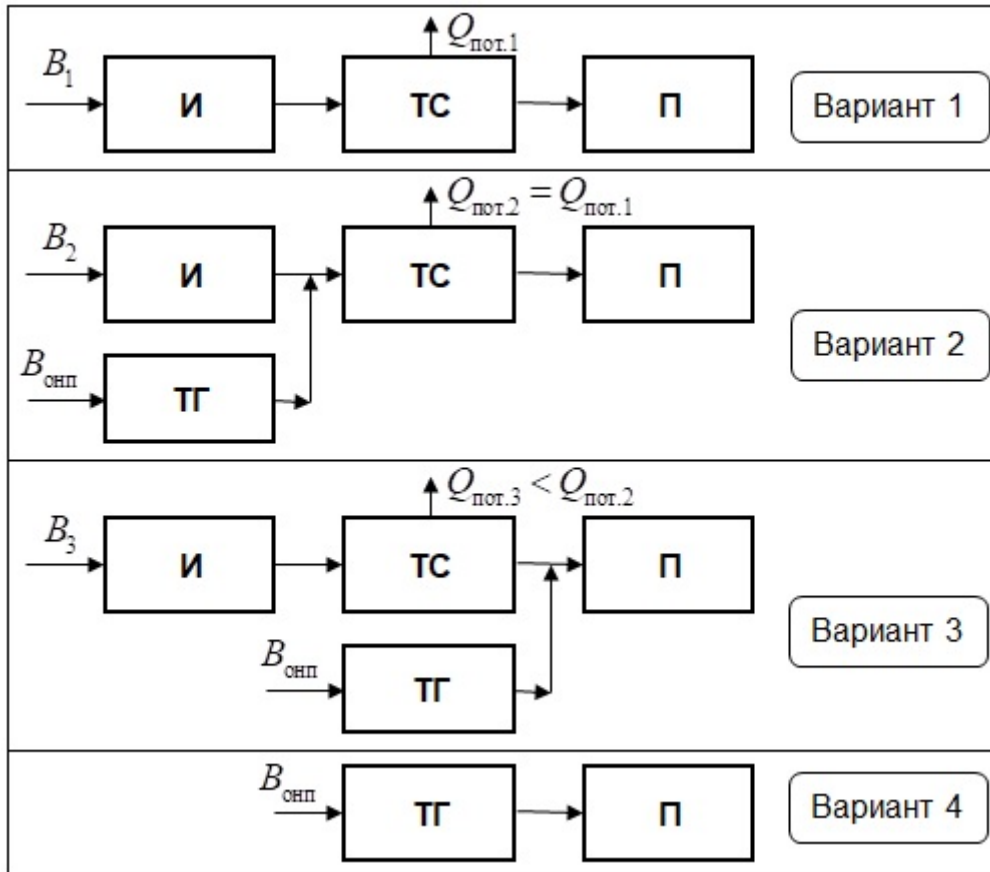
$$\Delta B_{\text{y.t}} = (B_1 - B_2) \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{Q_{\text{y.t}}} = B_{\text{онп}} \frac{Q_{\text{н.онп}}^{\text{p}} \eta_{\text{онп}}}{Q_{\text{y.t}} \eta_{\text{и}}} \quad (1)$$

Вариант 3: теплогенератор на ОНП подключается в месте размещения потребителя П с частичным вытеснением И, при этом $Q_{\text{пот.3}} < Q_{\text{пот.2}}$. Экономия топлива в И при переходе от варианта 1 к варианту 3

$$\Delta B_{\text{y.t}} = (B_1 - B_3) \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{Q_{\text{y.t}}} = B_{\text{онп}} \frac{Q_{\text{н.онп}}^{\text{p}} \eta_{\text{онп}}}{Q_{\text{y.t}} \eta_{\text{и}}} + \frac{Q_{\text{пот.1}} - Q_{\text{пот.3}}}{Q_{\text{y.t}} \eta_{\text{и}}} \quad (2)$$

Вариант 4: теплогенератор на ОНП подключается в месте размещения потребителя П с полной заменой И (вариант децентрализованного теплоснабжения). При этом выполняется условие

$$\frac{Q_{\text{пол}}}{\eta_{\text{п}}} = B_{\text{онп}} Q_{\text{н.онп}}^{\text{p}} \eta_{\text{онп}} \quad (3)$$



И – источник централизованного теплоснабжения; П – потребитель теплоты;
 ТС – тепловая сеть, связывающая источник И с потребителем П;
 ТГ – теплогенератор на ОНП; B_1, B_2, B_3 – расход топлива в И в вариантах 1, 2, 3;
 $B_{\text{онп}}$ – расход ОНП как топлива в ТГ; $Q_{\text{пот.1}}, Q_{\text{пот.2}}, Q_{\text{пот.3}}$ – тепловой поток,
 теряемый в ТС в вариантах 1, 2, 3, кВт; $Q_{\text{пол}}$ – полезная тепловая нагрузка
 потребителя, кВт

Рисунок 5 – Варианты подключения теплогенератора на ОНП в систему теплоснабжения

Экономия топлива в И при переходе от варианта 1 к варианту 4

$$\Delta B_{\text{у.т}} = B_1 \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{Q_{\text{у.т}}} = \frac{Q_{\text{пот.1}}}{Q_{\text{у.т}} \eta_{\text{и}}} + \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{у.т}} \eta_{\text{и}} \eta_{\text{п}}} = \frac{Q_{\text{пот.1}}}{Q_{\text{у.т}} \eta_{\text{и}}} + B_{\text{онп}} \frac{Q_{\text{н.онп}}^{\text{р}}}{Q_{\text{у.т}} \eta_{\text{и}}} \quad (4)$$

В (1) – (4) $\eta_{\text{и}}$ – КПД источника И; $\eta_{\text{п}}$ – КПД потребителя П; $\eta_{\text{онп}}$ – КПД теплогенератора на ОНП; $Q_{\text{н.онп}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания ОНП.

На основе результатов энергетических обследований показано, что размещение теплогенераторов на ОНП вблизи или непосредственно у потребителя может обеспечить значительную экономию топлива за счет децентрализации источников теплоснабжения и сокращения потерь в теплосетях.

Разработан и введен в эксплуатацию инсинераторный комплекс для термического обезвреживания твердых отходов морского терминала порта

Приморск с использованием ОНП в качестве топлива. Для отопления инсинератора используются топливные композиции из ОНП и горючей части нефтешламов, составляемые на основе результатов данной диссертационной работы. Композиции характеризуются теплотой сгорания не менее 42 МДж/кг и вязкостью не более 20 сСт, обеспечивая температуру факела не менее 1250 °С. Применение рекомендованных топливных композиций позволяет экономить до 33 % основного дизельного топлива посредством замены на ОНП.

В четвертой главе приведены результаты исследования условий экологически эффективного сжигания ОНП в промышленных установках.

Руководствуясь температурными зависимостями вязкости различных нефтяных топлив, установлена связь между диапазонами вязкостей и характерной для этих диапазонов теплотой сгорания топлив.

На основе допущения, что нефтепродукты – топлива и отработанные нефтепродукты – с одинаковой вязкостью имеют одинаковую теплоту сгорания, представлены данные, позволяющие оценить низшую теплоту сгорания ОНП (рисунок 6).

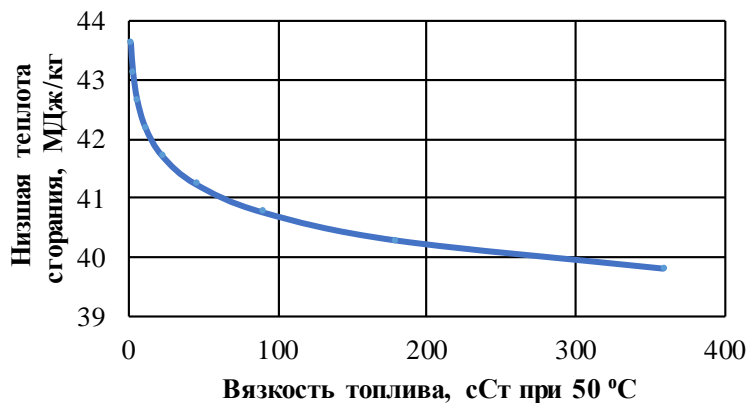


Рисунок 6 –
Зависимость $Q_{н.ОНП}^p$
от вязкости ОНП

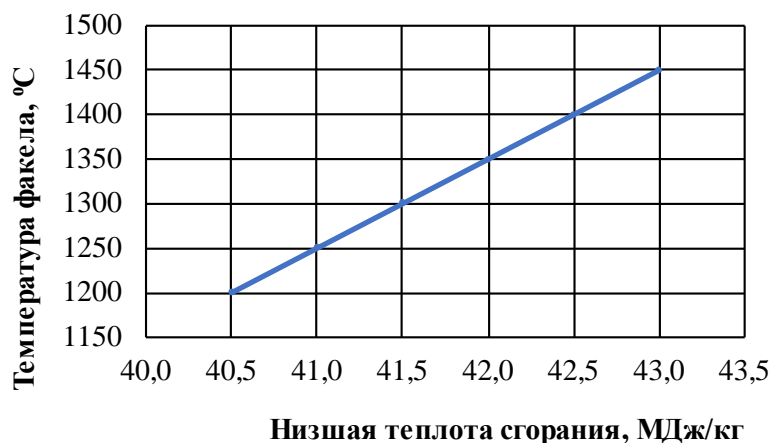


Рисунок 7 –
Зависимость
температуры факела
от $Q_{н.ОНП}^p$

В экспериментах на разработанной испарительной горелке установлена зависимость температуры факела от $Q_{н.ОНП}^p$ (рисунок 7), что позволяет связать температуру факела $T_{ф}$ с вязкостью ОНП (рисунок 8).

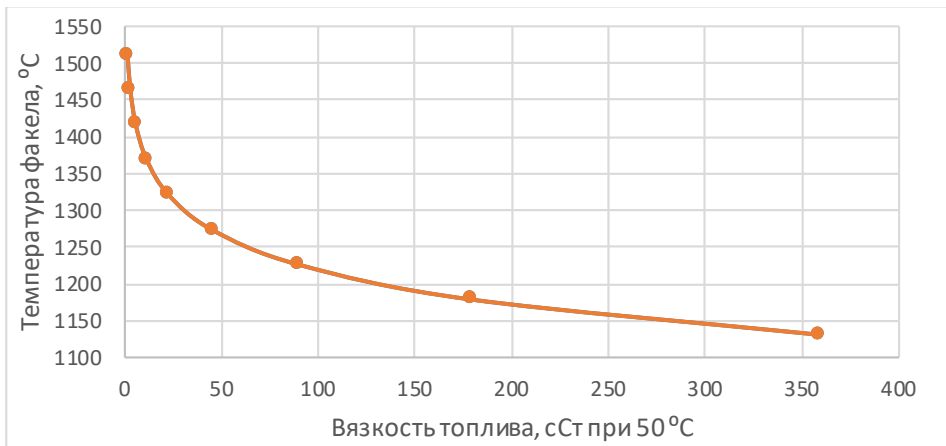


Рисунок 8 –
Зависимость
температуры
факела
от вязкости ОНП

В испарительной горелке на ОНП наблюдаются более светлые факелы, чем в распылительной. На основе экспериментальных данных принимаем, что температура факела испарительной горелки на 50 °C больше температуры факела распылительной горелки.

Одними из основных экологически опасных загрязнителей ОНП являются галогены и полихлорированные бифенилы (ПХБ), характеризующиеся концентрациями $C_{\text{гал}}$ и $C_{\text{ПХБ}}$, ppm. Пусть $C_{\text{гал}}^{\text{max}}$, $C_{\text{ПХБ}}^{\text{max}}$ – верхний допустимый предел концентрации галогенов и ПХБ в топливе из ОНП, определяемый исходя из экологических норм, ppm; $T_{\text{ф}}^{\text{min}}$ – минимально допустимый уровень температуры факела при горении ОНП, обеспечивающий экологически безопасное сжигание при заданном уровне $C_{\text{гал}}$ и $C_{\text{ПХБ}}$.

Установленная зависимость $T_{\text{ф}}$ от вязкости ОНП, сжигаемых в испарительной горелке (рисунок 8), позволяет конкретизировать формулировку задачи: установить связь между вязкостью ОНП и концентрациями загрязнителей – $C_{\text{гал}}^{\text{max}}$ и $C_{\text{ПХБ}}^{\text{max}}$, – которые должны быть обезврежены с соблюдением экологических норм при сжигании ОНП в испарительной горелке. Условие соблюдения экологических норм – реализация при сжигании ОНП температуры факела $T_{\text{ф}}$ не ниже уровня $T_{\text{ф}}^{\text{min}}$. Таким образом, в искомой области значений параметров экологически эффективного сжигания ОНП в испарительной горелке должны одновременно выполняться три условия:

$$C_{\text{гал}} \leq C_{\text{гал}}^{\text{max}}; C_{\text{ПХБ}} \leq C_{\text{ПХБ}}^{\text{max}}; \quad (5)$$

$$T_{\text{ф}} \geq T_{\text{ф}}^{\text{min}}. \quad (6)$$

Пусть v^{max} – максимальное значение кинематической вязкости ОНП (сСт при 50 °C), при котором выполняется условие (6). Следовательно, для ОНП условию (6) эквивалентно условие $v \leq v^{\text{max}}$.

Впервые установлено, что параметры ОНП на границе области экологически эффективного сжигания в испарительном горелочном устройстве подчиняются корреляционным уравнениям

$$v^{\max} C_{\text{гал}}^{\max} = 10000; \quad v^{\max} C_{\text{ПХБ}}^{\max} = 500, \quad (7)$$

где кинематическая вязкость имеет размерность сСт, а концентрации измеряются в ppm. Следовательно, уравнения (5), (6), описывающие область значений параметров экологически эффективного сжигания ОНП в испарительном горелочном устройстве, приводятся к виду

$$C_{\text{гал}} \leq 10000 / v; \quad C_{\text{ПХБ}} \leq 500 / v; \quad v \leq v_{\text{ИГУ}}^{\max}. \quad (8)$$

Здесь $v_{\text{ИГУ}}^{\max}$ – максимальная вязкость ОНП, сжигаемого в испарительном горелочном устройстве, при которой температура факела составляет 1200 °С – минимально допустимую величину для экологически безопасного сжигания ОНП. Согласно рисунку 8, для технологии испарительного сжигания $v_{\text{ИГУ}}^{\max}$ находится в диапазоне 125–130 сСт.

Впервые установлено, что при использовании распылительного горелочного устройства область экологически эффективного сжигания ОНП описывается соотношениями

$$C_{\text{гал}} \leq 4000 / v; \quad C_{\text{ПХБ}} \leq 200 / v; \quad v \leq v_{\text{РГУ}}^{\max}, \quad (9)$$

где $v_{\text{РГУ}}^{\max}$ – максимальная вязкость ОНП, сжигаемого в распылительном горелочном устройстве, при которой температура факела составляет 1200 °С. Согласно исследованиям автора, $v_{\text{РГУ}}^{\max}$ не превышает 65 сСт при 50 °С.

Результаты исследования, аккумулирующие отечественный и зарубежный опыт, накопленные экспериментальные данные можно использовать для создания отечественной нормативной документации по энергоэффективному и экологически безопасному сжиганию ОНП в теплотехнических установках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены исследования и систематизация состава и свойств ОНП, образующихся на объектах системы транспорта нефти, представлен анализ свойств и состава загрязнителей. Проанализированы результаты отечественных и зарубежных исследований, нормативных документов иностранных государств, содержащих требования к ОНП как топливу для использования в котельно-печном оборудовании. Установлено, что требованиям к топливу могут удовлетворять очищенные ОНП с низшей теплотой сгорания 40,5...43,5 МДж/кг и температурой вспышки не менее 38 °С.

2. Разработано и исследовано испарительное горелочное устройство для сжигания ОНП. Экспериментальные исследования, выполненные для широкой номенклатуры ОНП, подтвердили работоспособность горелочного устройства и возможность реализации в нем условий качественного и экологически безопасного сжигания (обеспечение температурного уровня и времени пребывания в факеле). Установлено, что в разработанном горелочном

устройстве целесообразно сжигать ОНП и их смеси с вязкостью до 110 сСт при 50 °С и коксуемостью не выше 6 % с возможностью поддержания концентрации NO_x и СО в продуктах горения на более низком уровне, чем при сжигании дизельного топлива.

3. Установлена для современных теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах связь между концентрацией галогенов в топливе $c_{\text{гал}}$, ppm, и тепловой мощностью Q , МВт, описываемая уравнением $c_{\text{гал}}Q = K_Q$, где нормативный коэффициент $K_Q = 600 \text{ ppm} \cdot \text{МВт}$. По мере совершенствования технологии очистки и сжигания отработанных нефтепродуктов, разработки более эффективных теплогенераторов величина нормативного коэффициента должна подлежать пересмотру в сторону его уменьшения, что будет отражать рост экологичности теплогенератора.

Разработаны и исследованы варианты энергоэффективного использования отработанных нефтепродуктов как источника энергии в системах теплоснабжения, разработана методика оценки энергосберегающего эффекта. Установлено, что размещение теплогенераторов на ОНП вблизи или непосредственно у потребителя может обеспечить значительную экономию топлива.

4. Исследование условий сжигания ОНП в промышленных установках позволило определить и аналитически описать границу области экологически эффективного сжигания отработанных нефтепродуктов с обезвреживанием содержащихся в них галогенов и полихлорированных бифенилов для испарительной и распылительной технологий сжигания.

Перспективы дальнейшей разработки имеют следующие направления:

- разработка теплогенераторов малой мощности с испарительными горелочными устройствами для автономного теплоснабжения, обезвреживания нефтесодержащих отходов и смежных теплотехнологий.
- разработка методики исследования ОНП как топлива и на ее основе – разработка национального стандарта для использования ОНП в качестве котельно-печного топлива.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК Минобрнауки

1. **Кожевников, В.А.** Энергоэффективное использование отработанных нефтепродуктов как топлива / В.А. Кожевников, С.К. Попов. – Вестник МЭИ. – 2020. – № 2. – С. 42–51.

2. **Кожевников, В.А.** Исследование качества сжигания отработанных нефтепродуктов в испарительной горелке / В.А. Кожевников, С.К. Попов, Э.А. Сериков. – Промышленная энергетика. 2020. № 8. С. 34–42.

3. **Кожевников, В.А.** Разработка горелочного устройства для сжигания отработанных нефтепродуктов / В.А. Кожевников, С.К. Попов. – Промышленная энергетика. – 2020. – № 4. – С. 26–36.

4. **Кожевников, В.А.** Эффективность применения автономных теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах / В.А. Кожевников, С.К. Попов, И.В. Яковлев. – Промышленная энергетика. – 2020. – № 6. – С. 44–52.

Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

5. **Kozhevnikov, V.A.** Environmental norms for energy-efficient use of Used Petroleum Products as boiler and furnace fuel / V.A. Kozhevnikov, S.K. Popov // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, March 11-13, 2021 9388076. – DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388076

Патенты на изобретения РФ

6. Горелочное устройство и способ организации факела горения топлива / П.А. Ревель-Муроз, О.Ю. Красоткина, **В.А. Кожевников**, О.В. Найденов (РФ); ПАО "Транснефть" (РФ), ООО "НИИ Транснефть" (РФ), ООО "Транснефть-Порт Приморск" (РФ); Пат. 2706168 РФ – Заяв. № 2019105925; Опубл. 14.11.2019. Бюл. № 32. Приоритет 01.03.2019 (РФ).

Публикации в других изданиях

7. Николаева, А.В. Анализ потенциала использования отработанных нефтепродуктов на собственные нужды в организациях системы «Транснефть» / А.В. Николаева, **В.А. Кожевников**, В.А. Черных // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. Т. 10. № 1. С. 70–83. – DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-1-70-83

8. Николаева, А.В. Применение отработанных нефтепродуктов как топлива для термического обезвреживания отходов / А.В. Николаева, **В.А. Кожевников**, В.А. Черных, О.В. Найденов, Р.Р. Давлетяров, А.В. Сальников // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 310–319. – DOI: 10.28999/2541-9595-2021-11-3-310-319

9. Росляков, П.В. Моделирование процесса горения нефти с подмесом подтоварной воды в жаротрубных котлах / П.В. Росляков, Ю.В. Проскурин, **В.А. Кожевников** // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 2. – С. 94–101. – DOI: 10.28999/2541-9595-2017-7-2-94-101

10. Захаров, С.В. Анализ потенциала использования отработанных масел / С.В. Захаров, **В.А. Кожевников**. – 2008. [Электронный ресурс] <http://www.energsovet.ru/stat424.html> (дата обращения: 13.09.2021).

11. Желнов, А.Ю. О некоторых итогах энергетических обследований / А.Ю. Желнов, **В.А. Кожевников**, В.М. Нагдасёв, К.В. Александров // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 11 (87). [Электронный ресурс] www.rosteplo.ru/nt/87 (дата обращения: 13.09.2021).

12. Захаров, С.В. Анализ потенциала использования отработанных масел для нужд теплоснабжения, с примерами / С.В. Захаров, **В.А. Кожевников**. – 2008. [Электронный ресурс] <http://www.energsovet.ru/stat423.html> (дата обращения: 13.09.2021).

13. **Кожевников, В.А.** Энергоаудит систем теплоснабжения. О некоторых аспектах / В.А. Кожевников. – 2009. [Электронный ресурс] http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2120 (дата обращения: 13.09.2021).

14. **Кожевников, В.А.** Теплогенераторы на отработанных маслах / В.А. Кожевников. – 2009. [Электронный ресурс] https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3727 (дата обращения: 13.09.2021).

15. Захаров, С.В. Отработанное масло. Анализ потенциала использования. Потенциал использования отработанных масел на нужды теплоснабжения / С.В. Захаров, **В.А. Кожевников** // III Международная конференция «Альтернативные источники энергии для больших городов» (окт. 2008 г., Москва). Сборник тезисов докладов Правительства Москвы. С. 91–93.

16. Медведева, Н.Д. Разработка метода удаления паровоздушных соединений, образующихся в емкостях для хранения и транспортировки нефти / Н.Д. Медведева, **В.А. Кожевников**, А.Б. Гаряев // «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: XXVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12–13 марта 2020 г., Москва). Тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020. – С. 640. – <https://reere.mpei.ru/abstracts/Documents/reere-XXVI.pdf>

17. Медведева, Н.Д. Моделирование процесса рекуперации паров нефти путем холодного орошения / Н.Д. Медведева, **В.А. Кожевников**, А.Б. Гаряев // «Энергия-2020»: XV Всероссийская (VII Международная) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (7–10 апреля 2020 г., Иваново). Тез. докл. – С. 42. – http://ispu.ru/files/Tom_2.PDF

18. **Кожевников, В.А.** Разработка нормативной базы для энергоэффективного использования отработанных нефтепродуктов в качестве котельно-печного топлива / В.А. Кожевников, С.К. Попов // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла [Текст]: сб. докл. / под общ. ред. д-ра техн. наук Г.А. Рябова // V Международная научно-техническая конференция. – М.: ОАО «ВТИ», 2020. – С. 124–130.

19. **Кожевников, В.А.** Экологические нормативы энергоэффективного использования отработанных нефтепродуктов в качестве котельно-печного топлива / В.А. Кожевников // «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: XXVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (11–12 марта 2021 г., Москва). Тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2021. – С. 645.

Подписано в печать _____ 2021 г. Зак. _____ Тир. 50. П.л. 1,25.

Типография МЭИ, Красноказарменная ул., д. 13, стр. 4.