

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА (05.14.04)

УДК 620.9:662.92.001.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-39-50

Теплотехнические и экологические характеристики сжигания отработанных нефтепродуктов в промышленных установках

В.А. Кожевников, С.К. Попов

Отработанные нефтепродукты можно эффективно использовать в качестве источника энергии в промышленной теплоэнергетике. Вопросы энергетической эффективности и экологической безопасности использования данного вида топлива, разработки горелочных устройств для отработанных нефтепродуктов чрезвычайно актуальны.

Для анализа энергетической эффективности промышленных установок, использующих отработанные нефтепродукты как топливо, необходимо знание теплоты сгорания отработанных нефтепродуктов. Систематизированы литературные данные по нижней теплоте сгорания и вязкости различных нефтяных топлив. Полученные результаты позволили оценить теплоту сгорания отработанных нефтепродуктов, используя в качестве параметра их вязкость.

Выполнен комплекс работ по созданию испарительного горелочного устройства, обеспечивающего качественное сжигание разнообразных отработанных нефтепродуктов. На основе экспериментальных исследований процесса сжигания различных видов отработанных нефтепродуктов в испарительной горелке выявлены связи между вязкостью, нижней теплотой сгорания, длиной и температурой факела. Установленные связи между теплотехническими характеристиками процесса горения отработанных нефтепродуктов позволяют оценить возможность эффективного обезвреживания загрязнителей — галогенов и полихлорированных бифенилов.

Определена и аналитически описана граница области экологически эффективного сжигания отработанных нефтепродуктов с обезвреживанием загрязнителей — галогенов и полихлорированных бифенилов. Представлены зависимости максимально допустимых концентраций загрязнителей в отработанных нефтепродуктах от вязкости, теплоты сгорания, температуры факела. Полученные результаты можно использовать для создания отечественной нормативной документации по энергоэффективному и экологически безопасному сжиганию отработанных нефтепродуктов в теплотехнических установках.

Ключевые слова: отработанные нефтепродукты, обезвреживание загрязнителей, галогены, полихлорированные бифенилы, энергетическая эффективность, экологическая безопасность.

Для цитирования: Кожевников В.А., Попов С.К. Теплотехнические и экологические характеристики сжигания отработанных нефтепродуктов в промышленных установках // Вестник МЭИ. 2022. № 1. С. 39—50. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-39-50.

Thermal and Environmental Characteristics of Spent Petroleum Product Combustion in Industrial Plants

V.A. Kozhevnikov, S.K. Popov

Spent petroleum products can be efficiently used as an energy source in industrial thermal power engineering. Matters concerned with the energy efficiency and environmental safety of using this type of fuel and development of burners for spent petroleum products are extremely relevant.

To analyze the energy efficiency of industrial plants that use spent petroleum products as fuel, the heating value of these products has to be known. The data on the lower heating value and viscosity of various petroleum fuels published in the literature are systematized. The results obtained make it possible to estimate the heating value of spent petroleum products by using their viscosity as a parameter.

A set of works aimed at developing an evaporative burner for high-quality combustion of various spent petroleum products has been accomplished. Based on experimental studies of the combustion of various spent petroleum products in the evaporative burner, relationships between the viscosity, lower heating value, and flame length and temperature are revealed. By using the obtained relationships between the thermal parameters characterizing the combustion of spent petroleum products, it becomes possible to assess the possibility of effectively neutralizing such pollutants as halogens and polychlorinated biphenyls.

The boundary of the domain in which spent petroleum products can be combusted in an environmentally efficient manner with neutralizing such pollutants as halogens and polychlorinated biphenyls has been determined and described analytically. Dependences of the maximum allowable concentrations of pollutants in spent petroleum products on their viscosity, lower heating value, and flame temperature are presented. The obtained results can be used to develop domestic regulatory documents on energy efficient and environmentally friendly combustion of spent petroleum products in thermal engineering plants.

Key words: spent petroleum products, pollutant neutralization, halogens, polychlorinated biphenyls, energy efficiency, environmental safety.

For citation: Kozhevnikov V.A., Popov S.K. Thermal and Environmental Characteristics of Spent Petroleum Product Combustion in Industrial Plants. Bulletin of MPEI. 2022;1:39—50. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-39-50.

Введение

Энергоэффективное использование отработанных нефтепродуктов (ОНП) в качестве котельно-печного топлива требует применения теплогенераторов, обеспечивающих экологически безопасное сжигание в широком диапазоне изменения состава, консистенции и вязкости ОНП. В [1, 2] исследованы состав и свойства ОНП. Результаты разработки испарительного горелочного устройства и изучения процесса горения ОНП представлены в [3 — 5].

Настоящая работа посвящена изучению теплотехнических и экологических характеристик сжигания ОНП в объектах промышленной теплоэнергетики, выявлению взаимосвязи этих характеристик.

Теплота сгорания отработанных нефтепродуктов и стандартных топлив

Для анализа энергетической эффективности теплогенераторов на ОНП важна оценка теплоты сгорания отработанных нефтепродуктов. Результаты работы в этом направлении даны в табл. 1.

Во второй колонке приведен ряд значений низшей теплоты сгорания жидкого топлива с шагом 293 кДж/кг в диапазоне от 39555 до 43657 кДж/кг, выбранном с учетом данных [6].

В шестой колонке указаны виды жидких нефтяных топлив, характеризующихся теплотами сгорания из второй колонки. Связь между видом топлива и его

Таблица 1

Топливные характеристики нефтепродуктов

Низшая теплота сгорания, кДж/кг	Вязкость при 50 °С, сСт		Коксуемость, %	Характерный нефтепродукт	Характеристика факела при сжигании ОНП	
	максимум	минимум				
39 555	400	300	> 6	Смазки, мазуты М-100 и М-40, судовые топлива	Факел прерывистый, коптящий; цвет оранжево-желтый (1100...1200 °С); время пребывания частиц в факеле более 1 с	
39 848	300	200				
40 141	200	120		Прим. 1	Мазуты М-100, М-40, Ф-12, масла, судовые топлива	Факел пульсирующий, короткий; цвет меняется от желтого до соломенного (1200...1300 °С); время пребывания частиц в факеле менее 2 с
40 434	150	90				
40 727	100	60	≤ 6		Мазут Ф-5, КПТ, судовые топлива, масла	Факел средней длины (от 4 до 7 калибров горелки); цвет меняется от желтовато-белого до ярко-белого (1300...1400 °С); время пребывания частиц в факеле примерно 2 с
41 020	80	45				
41 313	60	30		Масла, КПТ, ДТ, судовые топлива	Факел длинный (от 7 до 12 калибров); цвет меняется от белого до ослепительно-белого (1400...1500 °С); время пребывания частиц в факеле более 2 с	
41 606	40	15				
41 899	20	7	ДТ, керосин	Факел длинный (12–14 калибров), цвет меняется от ярко-белого до ослепительного (около 1500 °С и выше); время пребывания частиц в факеле более 2 с		
42 192	15	5				
42 485	10	4				
42 778	5	3				
43 071	4	2				
43 364	3	1				
43 657	2	0,9				

Примечания:

КПТ — котельно-печное топливо, нефть; ДТ — дизельное топливо; 1 — ограничение по коксуемости ≤ 6% выполняется для отработанных нефтепродуктов и практически никогда не выполняется для топочных [7] и судовых [12] топлив

теплотой сгорания установлена, исходя из анализа и обобщения данных, содержащихся в паспортах качества нефтепродуктов, протоколах испытаний топлив для котельных, справочниках, нормативных документах, ГОСТах [2].

Минимальные значения низшей теплоты сгорания мазутов установлены в [7, 8]. Низшая теплота сгорания дизельных топлив [9, 10] определяется техническими условиями в соответствии с [11]. Низшая теплота сгорания судовых топлив [12] устанавливается в зависимости от вязкости топлив по [7 — 9, 10]. Сведения о низшей теплоте сгорания по ГОСТам различаются с данными паспортов качества нефтепродуктов [13] и представляют собой некоторые диапазоны, характеризующие их сорта/марки.

Руководствуясь температурными зависимостями вязкости различных нефтяных топлив [14], определим ориентировочный диапазон вязкостей (границы указаны в третьей и четвертой колонках) для каждого топлива.

Примем допущение, что нефтепродукты (топлива и ОНП) с одинаковой вязкостью имеют одинаковую теплоту сгорания. Это позволит, используя вязкость как параметр, оценить посредством данных табл. 1 теплоту сгорания очищенного ОНП, соотнесенного с характерным нефтепродуктом.

В седьмой колонке даны характеристики процесса сжигания в испарительной горелке отработанных нефтепродуктов с вязкостями из интервала, определенного третьей и четвертой колонками. Указанные характеристики получены при испытаниях разработанного испарительного горелочного устройства (рис. 1), в котором последовательно реализованы две стадии:

1 — испарение и большей частью конверсия (крекинг) жидкого топлива с недостатком первичного воздуха;

2 — воспламенение и полное сгорание образовавшейся газообразной фазы (продуктов конверсии) с избытком вторичного воздуха.

Устройство снабжено дожигателем 3 со встроенной фурмой 5 подачи вторичного воздуха от компрессора.

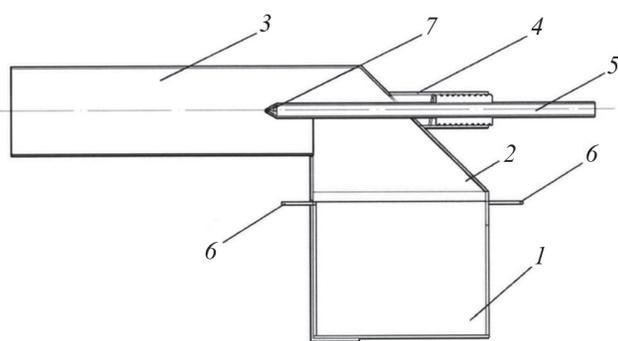


Рис. 1. Конструктивная схема горелочного устройства [3, 4]:

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

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.

Качество сжигания контролировалось по составу продуктов горения. Температура факела определялась с использованием шкалы цветов факела для визуального контроля горения жидких углеводородных топлив [4]. Методика экспериментальных исследований, описание и приборное оснащение экспериментального стенда изложены в [5].

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 (колонка 5 табл. 1), не превышает 6%. Данная величина соответствует коксуемости флотских мазутов Ф-5 и Ф-12, равной 6% по ГОСТ 10585 — 99 [7].

Прочие ОНП, которые нельзя использовать в испарительной горелке как топливо, можно утилизировать иными способами согласно действующим нормам.

Анализ состава продуктов горения приводит к выводу, что разработанная испарительная горелка поддерживает концентрации NO_x и CO при сжигании ряда ОНП на более низком уровне, чем при сжигании дизельного топлива, взятого в качестве эталона для оценочного сравнения [5].

В экспериментах достигнута мощность горелки в 45 кВт. Помимо решения исследовательских задач, горелку можно использовать на объектах промышленной теплоэнергетики для сжигания небольших количеств ОНП на месте их образования.

Связи между теплотой сгорания, вязкостью топлива, длиной и температурой факела

Температура факела и время пребывания продуктов горения в объеме факела — важные параметры, обеспечивающие экологически безопасное сжигание ОНП, содержащих хлорорганические соединения и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [4, 15]. Время пребывания в зоне горения зависит от длины факела.

В ходе проведенных испытаний горелочного устройства установлена зависимость длины факела от вязкости ОНП и давления (расхода) вторичного воздуха [4], представленная в табл. 2 и на рис. 2.

Максимальная длина факела (верхняя кривая, рис. 2) получена при избыточном давлении вторичного воздуха до 2 атм., а минимальная длина (нижняя кривая, рис. 2) — при 0,1 атм. Средняя длина факела рассчитана как среднеарифметическое максимального и минимального значений. С ростом давления (а значит, и расхода) вторичного воздуха наблюдается увеличение длины и температуры факела.

Эксперименты показали, что для создания стабильного факела желтовато-белых и белых цветов (с темпе-

Таблица 2

Влияние вязкости ОНП на длину факела

Наименование показателя	Значение показателя									
	1,4	2,8	5,6	11,2	22,4	44,8	89,6	179,2	358,4	
Вязкость ОНП при 50 °С, сСт										
Длины факела, см:										
максимальная	135	120	105	90	75	60	45	30	15	
минимальная	45	40	35	30	25	20	15	10	5	
средняя	90	80	70	60	50	40	30	20	10	

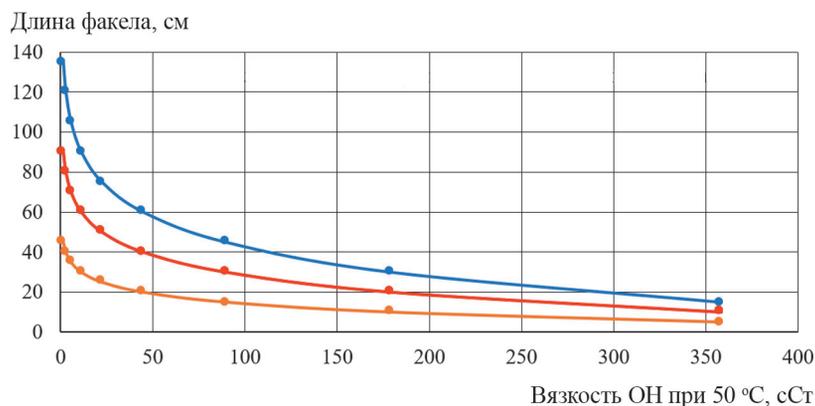


Рис. 2. Зависимость длины факела от вязкости ОНП:

●, ●, ● — максимальная, минимальная и средняя длины

ратурой свыше 1250 °С) топливная масса должна быть однородной консистенции и относительно невысокой вязкости (до 90 сСт при 50 °С). У осадочных нефтепродуктов, трансмиссионных масел и аналогичных нефтяных смесей с различной плотностью фракций и наличием загрязнений [2] однородность отсутствует, что порождает нестабильные пульсирующие факелы. Это наблюдается и при испытании смесей ОНП вязкостью от 110 до 90 сСт, когда факел переходит от желтых в желтовато-белые цвета, чему соответствует превышение температурного уровня 1250 °С. Для достижения указанной температуры требуется создание дополнительного разогрева сложных по консистенции нефтяных смесей (мазутных фракций) или организа-

ция интенсивного перемешивания топливной массы в горелке. В противном случае температура факела опустится ниже 1200 °С, что сопровождается недожогом топлива и выходом ПАУ [16, 17]. Такой результат наблюдался при сжигании мазута М-100.

В ходе исследования процесса сжигания стандартных топлив в распылительных горелках и ОНП в разработанной испарительной горелке накоплена фото- и видеоинформация о цвете и форме факела. Ее обработка в части для распылительных горелок в [4, 6, 18] позволяет заполнить первые три строки в табл. 3. Соответствующая максимальная температура факела (строка 4, табл. 3) определена по шкале цветов факела [4].

Таблица 3

Сравнение цветовых характеристик факелов

Наименование показателя	Значение				
	мазут М-100	мазут М-40	мазут Ф-12	мазут Ф-5	ДТ летнее
Вид стандартного топлива	мазут М-100	мазут М-40	мазут Ф-12	мазут Ф-5	ДТ летнее
Низшая теплота сгорания, МДж/кг, не менее	40,5	41,0	41,5	42,0	43,0
Цвет факела стандартного топлива (распылительная горелка)	оранжево-желтый	желтый	желто-белый	белый	ярко-белый
Температура факела стандартного топлива (распылительная горелка), °С	1150	1200	1250	1300	1400
Цвет факела ОНП с близкой низшей теплотой сгорания (испарительная горелка)	соломенно-желтый	соломенно-белый	белый	ярко-белый	ослепительно-белый
Температура факела на ОНП (испарительная горелка), °С	1200	1250	1300	1350	1450

С учетом допущения, что стандартные топлива и ОНП с одинаковой вязкостью обладают одинаковой теплотой сгорания, получим возможность из массива накопленных экспериментальных данных по сжиганию ОНП в разработанной испарительной горелке [2, 4, 18, 19] подобрать для каждого столбца табл. 3 ОНП с близкой теплотой сгорания и проанализировать цвет факела.

Итоги анализа, представленные в пятой строке табл. 3, показывают, что в испарительной горелке на ОНП наблюдаются более светлые факелы. Следовательно, их температурный уровень выше, чем отмеченный в четвертой строке. Пусть температура факела испарительной горелки на 50 °С больше температуры факела распылительной горелки, тогда получим температуры, внесенные в шестую строку табл. 3.

Данные табл. 3 позволяют установить для ОНП связь между низшей теплотой сгорания и средней температурой факела (рис. 3).

Представленная на рис. 3 зависимость температуры факела T_{ϕ} , °С от низшей теплоты сгорания Q_n^p , МДж/кг, описывается линейной функцией

$$T_{\phi} = 100Q_n^p - 2850. \quad (1)$$

Данные табл. 1, 2 помогают найти связь между вязкостью ОНП, теплотой сгорания и средней длиной факела (табл. 4).

На основе данных табл. 4 получена аналитическая линейная зависимость длины факела L_{ϕ} , см, от низшей теплоты сгорания:

$$L_{\phi} = 21Q_n^p - 826.$$

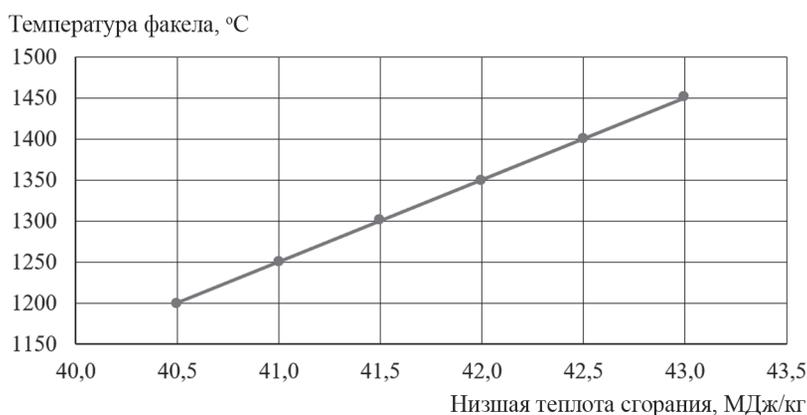


Рис. 3. Зависимость температуры факела от низшей теплоты сгорания ОНП

На рис. 4 представлена зависимость Q_n^p от вязкости ОНП, построенная по данным табл. 4.

Полученные зависимости позволяют выявить связь между вязкостью ОНП и температурой факела, рассчитанной по (1) (табл. 5, рис. 5).

В результате проведенных исследований впервые установлены связи между вязкостью, низшей теплотой сгорания, длиной и температурой факела при сжигании ОНП в испарительной горелке. Некоторые аналогичные связи для судовых топлив описаны в [20].

Найденные связи между теплотехническими характеристиками процесса горения ОНП позволяют оценить эффективность обезвреживания галогенов и полихлорированных бифенилов (ПХБ), которые могут содержаться в отработанных нефтепродуктах.

Определение области значений параметров экологически эффективного сжигания отработанных нефтепродуктов в испарительной горелке

Основными экологически опасными загрязнителями ОНП считаются галогены и ПХБ. Концентрация галогенов $C_{гал}$ и полихлорированных бифенилов меняется в ОНП в широких пределах.

В отечественной практике не нормируют содержание галогенов и полихлорированных бифенилов в котельно-печных топливах. В зарубежной практике установлены нормы и контроль обращения топлив, содержащих галогены и ПХБ [1, 2, 21 — 23]. В данных документах уровень максимально допустимых концентраций галогенов и ПХБ, установленный с учетом состава продук-

Таблица 4

Связь между вязкостью, теплотой сгорания ОНП и длиной факела

Наименование показателя	Значение								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Средняя длина факела, см	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Вязкость топлива при 50 °С, сСт	358,4	179,2	89,6	44,8	22,4	11,2	5,6	2,8	1,4
Низшая теплота сгорания ОНП, МДж/кг	39,81	40,29	40,76	41,24	41,71	42,19	42,67	43,14	43,62

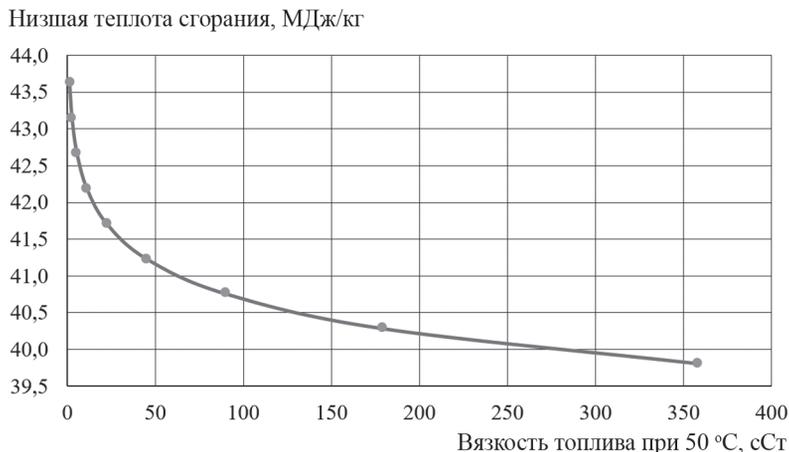


Рис. 4. Зависимость низшей теплоты сгорания от вязкости ОНП

Таблица 5

Связь между вязкостью, низшей теплотой сгорания ОНП и температурой факела

Наименование показателя	Значение									
Вязкость ОНП при 50 °С, сСт	358,4	179,2	89,6	44,8	22,4	11,2	5,6	2,8	1,4	
Низшая теплота сгорания ОНП, МДж/кг	39,81	40,29	40,76	41,24	41,71	42,19	42,67	43,14	43,62	
Температура факела, °С	1131	1179	1226	1274	1321	1369	1417	1464	1512	

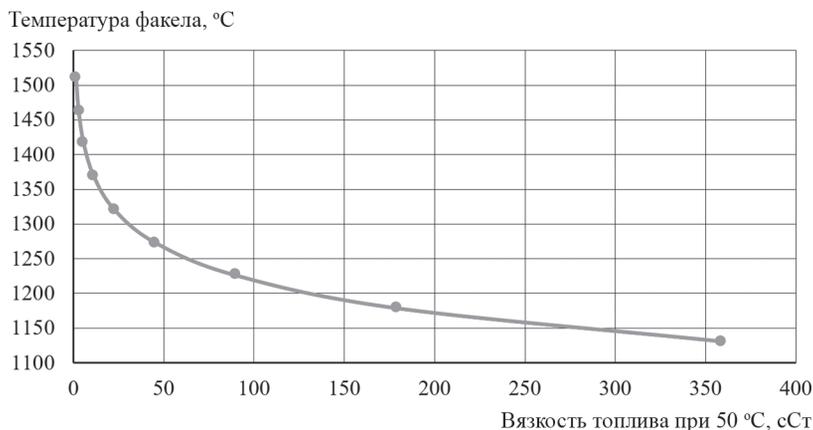


Рис. 5. Зависимость температуры факела от вязкости ОНП

тов горения и предельно допустимых концентраций [9, 23 — 30], связан с температурным уровнем процесса горения топлив: чем выше концентрация галогенов и ПХБ, тем выше требуется температура для их деструкции.

Пусть $C_{гал}^{max}$, $C_{ПХБ}^{max}$ — верхние допустимые пределы концентрации галогенов и ПХБ в топливе из ОНП, определяемые, исходя из экологических норм; $T_{ф}^{min}$ — минимально допустимый уровень температуры факела при горении ОНП, обеспечивающий экологически безопасное сжигание при заданных уровнях $C_{гал}$ и $C_{ПХБ}$ (концентраций в ОНП галогенов и ПХБ).

Определение области значений параметров экологически эффективного сжигания ОНП в испарительной горелке — задача с большим научным и практическим значением.

Установленная зависимость температуры факела от вязкости ОНП, сжигаемых в испарительной горелке (см. рис. 5), позволяет конкретизировать формулировку задачи: найти связь между вязкостью ОНП и концентрациями загрязнителей $C_{гал}^{max}$, $C_{ПХБ}^{max}$, которые должны быть обезврежены с соблюдением экологических норм при сжигании ОНП в испарительной горелке. Условие соблюдения экологических норм — реализация при сжигании ОНП температуры факела $T_{ф}$ не ниже уровня $T_{ф}^{min}$.

В результате, определив вязкость конкретного ОНП, можно установить, каковы максимально допустимые уровни $C_{гал}$ и $C_{ПХБ}$ в ОНП, чтобы его сжигание в испарительной горелке было экологически безопасным.

Таким образом, в искомой области значений параметров экологически эффективного сжигания ОНП

в испарительной горелке должны одновременно выполняться три условия:

$$\begin{cases} C_{гал} \leq C_{гал}^{max}; & (2) \\ C_{ПХБ} \leq C_{ПХБ}^{max}; & (3) \\ T_{\phi} \geq T_{\phi}^{min}. & (4) \end{cases}$$

Решить поставленную задачу можно с помощью зарубежных нормативных документов. Результаты решения, аккумулирующие отечественный и зарубежный опыт, основанные на представленных выше экспериментальных данных, послужат для создания отечественной нормативной документации.

Пусть μ^{max} — максимальное значение вязкости ОНП (сСт при 50 °С), при которой выполняется условие (4). Таким образом, для ОНП условию (4) эквивалентно условие $\mu \leq \mu^{max}$.

Согласно [23, 25, 28, 29, 30], вещества с концентрацией галогенов более 10000 ppm и ПХБ от 500 ppm следует обезвреживать на сжигающих отходы заводах в высокотемпературных топках и плазменных установках при температуре 1600 ± 100 °С. Следовательно, для данной группы веществ с $C_{гал}^{max} = 10000$ ppm и $C_{ПХБ}^{max} = 500$ ppm примем температуру факела $T_{\phi}^{min} = 1600$ °С. В приложении к ОНП из рис. 5 получим, что для обеспечения подобной температуры факела ОНП должен иметь вязкость не больше 1 сСт. Таким образом, при $C_{гал}^{max} = 10000$ ppm, $C_{ПХБ}^{max} = 500$ ppm и $T_{\phi}^{min} = 1600$ °С вязкость μ^{max} составит 1 сСт (колонка 3, табл. 6). Соотношение предельных концентраций $K_C = C_{гал}^{max}/C_{ПХБ}^{max} = 10000/500 = 20$.

В соответствии с международным стандартом ISO 8217 [20], отработанные масла применяют в качестве Residual-топлива в диапазоне вязкости от 10 до 700 сСт при 50 °С, на которые распространяются нормы [22, 23]: не более 1000 ppm галогенов и 50 ppm ПХБ. Для сжигания ОНП с минимальным экологическим риском требуется температура не менее 1300 °С [16, 23, 25, 28, 30]. Согласно рис. 5, температуре 1300 °С соответствует вязкость 25...30 сСт.

С целью создания запаса по экологичности сжигания выберем вязкость 10 сСт — нижнюю границу для Residual-топлива. Температура факела в испарительной горелке превысит 1300 °С. Сформируем четвертую колонку табл. 6 следующим образом: $C_{гал}^{max} = 1000$ ppm,

$C_{ПХБ}^{max} = 50$ ppm, $T_{\phi}^{min} = 1300$ °С, $\mu^{max} = 10$ сСт. Соотношение предельных концентраций $K_C = C_{гал}^{max}/C_{ПХБ}^{max} = 1000/50 = 20$.

Из анализа нормативных документов [1] по экологически безопасному сжиганию ОНП следует, что при концентрации $C_{ПХБ} < 5$ ppm допустимо (постоянное) открытое пламя.

Если

$$5 \leq C_{ПХБ} \leq 10 \text{ ppm}, \quad (5)$$

то допустимо (кратковременное) открытое либо (постоянное) закрытое пламя [1, 23]. При организации закрытого пламени минимально допустимая температура факела равна 1200 °С на нижней границе промежутка (5), т. е. при $C_{ПХБ} = 5$ ppm [1, 17, 23, 26, 30 — 33], и 1250 °С для прочих значений СПХБ из указанного промежутка.

При соблюдении изложенных требований к температуре факела сжигание ОНП считается экологически безопасным, если одновременно выполняются условия $C_{ПХБ} < 10$ ppm и $C_{гал} < 200$ ppm [16, 26, 27, 31–33].

Рассмотрим верхнюю границу промежутка (5). Для данной границы с $C_{ПХБ}^{max} = 10$ ppm, $C_{гал}^{max} = 200$ ppm и температурой факела $T_{\phi}^{min} = 1250$ °С температурный уровень можно реализовать в испарительной горелке при сжигании ОНП с вязкостью около 65 сСт (см. рис. 5). Следовательно, при меньшей вязкости ожидается температура, большая, чем 1250 °С. Поэтому для выявления границ искомой области возьмем вязкость $\mu^{max} = 50$ сСт, как верхнюю границу вязкости ОНП, при которой гарантированно достигается температурный уровень не менее 1250 °С. В итоге получим совокупность данных, приведенных в пятой колонке табл. 6: $C_{ПХБ}^{max} = 200$ ppm, $C_{гал}^{max} = 10$ ppm, $T_{\phi}^{min} = 1250$ °С, $T_{\phi}^{min} = 50$ сСт. Соотношение предельных концентраций $K_C = C_{гал}^{max}/C_{ПХБ}^{max} = 200/10 = 20$, — такую же, как в предыдущих рассмотренных случаях.

Нижней границе промежутка (5) с концентрацией $C_{ПХБ}^{max} = 5$ ppm соответствует минимально допустимая температура факела 1200 °С. По аналогии с другими точками искомого пространства (колонки 3, 4, 5, табл. 6) примем, что в данном случае выполняется соотношение $K_C = 20$. В спроектированной испарительной горелке температура факела 1200 °С наблюдается при сжигании ОНП с вязкостью 125...130 сСт (см. рис. 5). Таким образом, выбрав для нижней границы промежутка (5)

Таблица 6

Значения параметров на границе области экологически эффективного сжигания ОНП

Наименование параметра	Значение параметра			
Максимально допустимая концентрация ПХБ $C_{ПХБ}^{max}$, ppm	500	50	10	5
Максимально допустимая концентрация галогенов $C_{гал}^{max}$, ppm	10000	1000	200	100
Минимально допустимая температура факела T_{ϕ}^{min} , °С	1600	1300	1250	1200
Максимально допустимая вязкость ОНП при 50 °С μ^{max} , сСт	1	10	50	100

вязкость 100 сСт, получим, что температура факела с большой вероятностью превысит уровень 1200 °С. Граничная точка искомого пространства с координатами $C_{гал}^{max} = 100$ ppm, $C_{ПХБ}^{max} = 5$ ppm, $T_{ф}^{min} = 1200$ °С, $\mu^{max} = 100$ сСт представлена в шестой колонке табл. 6.

Анализ данных табл. 6 приводит к выводу, что параметры ОНП на границе области экологически эффективного сжигания в испарительной горелке подчиняются следующим корреляционным уравнениям:

$$\mu^{max} C_{гал}^{max} = 10000;$$

$$\mu^{max} C_{ПХБ}^{max} = 500,$$

где вязкость имеет размерность сСт при 50 °С, а концентрации измеряются в ppm.

Уравнения (2) — (4), описывающие область значений параметров экологически эффективного сжигания ОНП в испарительной горелке, приведем к виду:

$$\begin{cases} C_{гал} \leq 10000 / \mu; \\ C_{ПХБ} \leq 500 / \mu; \\ \mu \leq \tilde{\mu}. \end{cases}$$

Здесь $\tilde{\mu} = 125$ сСт — вязкость ОНП, при которой температура факела, согласно рис. 5, составляет 1200 °С (минимально допустимую величину для экологически безопасного сжигания ОНП).

Итоги проведенного исследования подведены в табл. 7, где даны значения вязкости, теплоты сгорания, температуры факела и концентрации загрязнителей на границе области экологически эффективного сжигания ОНП.

Значения, приведенные в табл. 7, проиллюстрированы на рис. 6 — 8.

Таблица 7

Значения теплотехнических свойств ОНП и концентраций загрязнителей на границе области экологически эффективного сжигания

Наименование параметра	Значение параметра					
	125	89,6	44,8	22,4	11,2	5,6
Вязкость топлива при 50 °С, сСт	125	89,6	44,8	22,4	11,2	5,6
Максимально допустимая концентрация ПХБ, ppm	4,0	5,6	11,2	22,3	44,6	89,3
Максимально допустимая концентрация галогенов, ppm	80	112	224	446	892	1786
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	40,50	40,76	41,24	41,71	42,19	42,67
Температура факела, °С	1200	1226	1274	1321	1369	1417

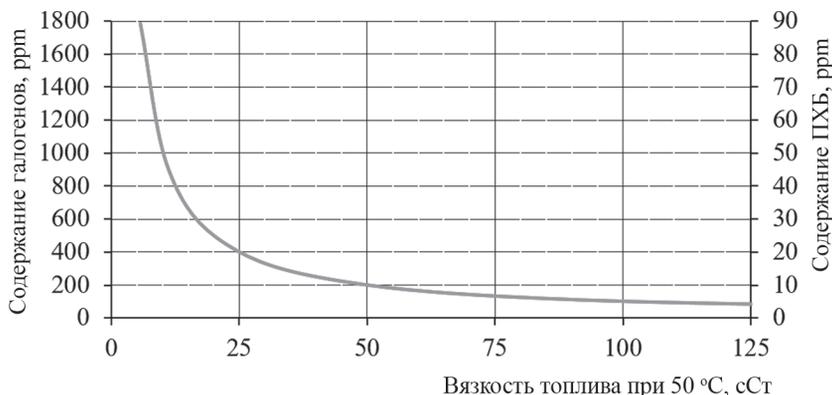


Рис. 6. Зависимости максимально допустимой концентрации галогенов и ПХБ в ОНП от вязкости

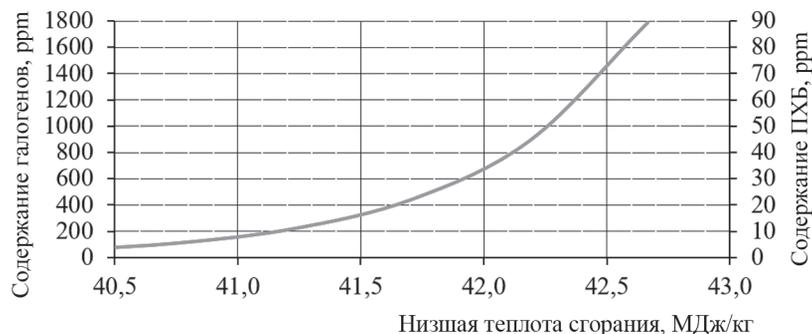


Рис. 7. Зависимости максимально допустимой концентрации галогенов и ПХБ в ОНП от низшей теплоты сгорания

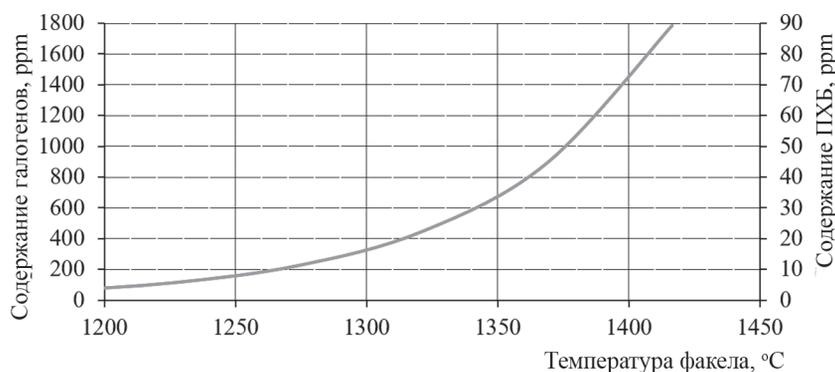


Рис. 8. Зависимость максимально допустимой концентрации галогенов и ПХБ в ОНП от температуры факела

Заключение

С помощью температурных зависимостей 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 обладают одинаковой теплотой сгорания, представлены сведения, позволяющие оценить теплоту сгорания ОНП, соотнесенного с характерным нефтепродуктом.

Опираясь на значительный объем экспериментальных исследований процесса сжигания различных видов ОНП, впервые выявлены связи между вязкостью,

низшей теплотой сгорания, длиной и температурой факела при сжигании ОНП в испарительном горелочном устройстве.

Установленные связи между теплотехническими характеристиками процесса горения ОНП позволили определить и аналитически описать границу области экологически эффективного сжигания ОНП с обезвреживанием галогенов и полихлорированных бифенилов.

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.

Литература

1. Кожевников В.А., Попов С.К. Энергоэффективное использование отработанных нефтепродуктов в качестве топлива // Вестник МЭИ. 2020. № 2. С. 42—51.
2. Николаева А.В., Кожевников В.А., Черных В.А. Анализ потенциала использования отработанных нефтепродуктов на собственные нужды в организациях системы «Транснефть» // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. № 1. С. 70—83.
3. Пат. № 2706168 РФ. Горелочное устройство и способ организации факела горения топлива /П.А. Ревель-Муроз и др. // Бюл. изобрет. 2019 № 32.
4. Кожевников В.А., Попов С.К. Разработка горелочного устройства для сжигания отработанных нефтепродуктов // Промышленная энергетика. 2020. № 4. С. 26—36.
5. Кожевников В.А., Попов С.К., Сериков Э.А. Исследование качества сжигания отработанных нефтепродуктов в испарительной горелке // Промышленная энергетика. 2020. № 8. С. 34—42.
6. Life Cycle Assessment of Used Oil Management. Prepared for the American Petroleum Institute [Офис. сайт] www.api.org/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Publications/LCA-of-Used-Oil-Mgmt-ERM-10012017.pdf (дата обращения 03.08.2021).

References

1. Kozhevnikov V.A., Popov S.K. Energoeffektivnoe Ispol'zovanie Otrabotannykh Nefteproduktov v Kachestve Topliva. Vestnik MEI. 2020;2:42—51. (in Russian).
2. Nikolaeva A.V., Kozhevnikov V.A., Chernykh V.A. Analiz Potentsiala Ispol'zovaniya Otrabotannykh Nefteproduktov na Sobstvennyye Nuzhdy v Organizatsiyakh Sistemy «Transneft». Nauka i Tekhnologii Truboprovodnogo Transporta Nefti i Nefteproduktov. 2020;1:70—83. (in Russian).
3. Pat. № 2706168 RF. Gorelochnoe Ustroystvo i Sposob Organizatsii Fakela Gorenija Topliva /P.A. Revel'-Muroz i dr. Byul. izobret. 2019;32. (in Russian).
4. Kozhevnikov V.A., Popov S.K. Razrabotka Gorelochnogo Ustroystva dlya Szhiganiya Otrabotannykh Nefteproduktov. Promyshlennaya Energetika. 2020;4:26—36. (in Russian).
5. Kozhevnikov V.A., Popov S.K., Serikov E.A. Issledovanie Kachestva Szhiganiya Otrabotannykh Nefteproduktov v Isparitel'noy Gorelke. Promyshlennaya Energetika. 2020;8:34—42. (in Russian).
6. Life Cycle Assessment of Used Oil Management. Prepared for the American Petroleum Institute [Ofits. Sayt] www.api.org/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Publications/LCA-of-Used-Oil-Mgmt-ERM-10012017.pdf (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

7. **ГОСТ 10585—99.** Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия.
8. **ГОСТ 14298—79.** Топливо нефтяное для мартеновских печей. Технические условия.
9. **ГОСТ 305—2013.** Топливо дизельное. Технические условия.
10. **ГОСТ Р 55475—2013.** Топливо дизельное зимнее и арктическое депарафинированное. Технические условия.
11. **ГОСТ 21261—91.** Нефтепродукты. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания.
12. **ГОСТ 32510—2013 (ИСО 8217:2017).** Топлива судовые. Технические условия.
13. **NGE.RU.** Независимая торговая площадка по нефтепродуктам в России и СНГ [Официальный сайт] www.nge.ru/product_guide_list_11_1.htm (дата обращения 03.08.2021).
14. **Правила** технической эксплуатации судовых дизелей [Электронный ресурс] www.morkniga.ru/p201669.html (дата обращения 03.08.2021).
15. **Кожевников В.А., Попов С.К., Яковлев И.В.** Эффективность применения автономных теплогенераторов на отработанных нефтепродуктах // Промышленная энергетика. 2020. № 6. С. 44–52.
16. **Раздел AR-42** архива Агентства охраны окружающей среды США «Air Emissions Factors and Quantification» [Официальный сайт] www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/index.html; www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s03.pdf; www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s03.pdf; www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s11.pdf; www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s11.pdf (дата обращения 03.08.2021).
17. **Кожевников В.А., Захаров С.В.** Анализ потенциала использования отработанных масел [Электронный ресурс] www.energsovet.ru/stat424.html (дата обращения 03.08.2021).
18. **Видеоматериалы** Термопортал.RU [Электронный ресурс] www.termoportal.ru/threads/video-gorelki-na-otrabotannom-masle.480/; www.termoportal.ru/threads/gorelki-na-otrabotannom-masle-svoimi-rukami-video.478/ (дата обращения 03.08.2021).
19. **Видеоматериалы** экспериментальной горелки [Электронный ресурс] www.youtube.com/watch?v=edbfNJwBOPw&feature=emb_title; www.youtube.com/watch?v=AY_dmd1kUoQ&feature=emb_title (дата обращения 03.08.2021).
20. **ГОСТ Р 54299—2010.** Топлива судовые. Технические условия.
21. **Title 40 CFR Part 260.** Hazardous Waste Management System: General [Электронный ресурс] www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=b656ab603496daf6d620241043222e6a&mc=true&node=pt40.28.260&rgn=div5 (дата обращения 03.08.2021).
22. **Title 40 CFR Part 279.** Standards for the Management of Used Oil [Электронный ресурс] www.ecfr.gov/
7. **GOST 10585—99.** Topливо Neftyanoe. Mazut. Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).
8. **GOST 14298—79.** Topливо Neftyanoe dlya Martenovskikh Pechey. Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).
9. **GOST 305—2013.** Topливо Dizel'noe. Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).
10. **GOST R 55475—2013.** Topливо Dizel'noe Zimnee i Arkticheskoe Deparafinirovannoe. Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).
11. **GOST 21261—91.** Nefteprodukty. Metod Opredeleniya Vysshey Teploty Sgoraniya i Vychislenie Nizshey Teploty Sgoraniya. (in Russian).
12. **GOST 32510—2013 (ISO 8217:2017).** Topliva Sudovye. Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).
13. **NGE.RU.** Nezavisimaya Torgovaya Ploshchadka po Nefteproduktam v Rossii i SNG [Ofits. Sayt] www.nge.ru/product_guide_list_11_1.htm (Data Obrashcheniya 03.08.2021). (in Russian).
14. **Pravila** Tekhnicheskoy Ekspluatatsii Sudovykh Dizeley [Elektron. Resurs] www.morkniga.ru/p201669.html (Data Obrashcheniya 03.08.2021). (in Russian).
15. **Kozhevnikov V.A., Popov S.K., Yakovlev I.V.** Effektivnost' Primeneniya Avtonomnykh Teplogeneratorov na Otrabotannykh Nefteproduktakh. Promyshlennaya Energetika. 2020;6:44–52. (in Russian).
16. **Razdel AR-42** Arkhiva Agentstva Okhrany Okruzhayushchey Sredy SSHA «Air Emissions Factors and Quantification» [Ofits. Sayt] www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/index.html; www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s03.pdf; www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s03.pdf; www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s11.pdf; www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s11.pdf (Data Obrashcheniya 03.08.2021). (in Russian).
17. **Kozhevnikov V.A., Zakharov S.V.** Analiz Potentsiala Ispolzovaniya Otrabotannykh Masel [Elektron. Resurs] www.energsovet.ru/stat424.html (Data Obrashcheniya 03.08.2021). (in Russian).
18. **Videomaterialy** Termoportal.RU [Elektron. Resurs] www.termoportal.ru/threads/video-gorelki-na-otrabotannom-masle.480/; www.termoportal.ru/threads/gorelki-na-otrabotannom-masle-svoimi-rukami-video.478/ (Data Obrashcheniya 03.08.2021). (in Russian).
19. **Videomaterialy** eksperimental'noy Gorelki [Elektron. Resurs] www.youtube.com/watch?v=edbfNJwBOPw&feature=emb_title; www.youtube.com/watch?v=AY_dmd1kUoQ&feature=emb_title (Data Obrashcheniya 03.08.2021). (in Russian).
20. **GOST R 54299—2010.** Topliva Sudovye. Tekhnicheskie Usloviya. (in Russian).
21. **Title 40 CFR Part 260.** Hazardous Waste Management System: General [Elektron. Resurs] www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=b656ab603496daf6d620241043222e6a&mc=true&node=pt40.28.260&rgn=div5 (Data Obrashcheniya 03.08.2021).
22. **Title 40 CFR Part 279.** Standards for the Management of Used Oil [Elektron. Resurs] www.ecfr.gov/

cgi-bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.29.279&rgn=div5 (дата обращения 03.08.2021).

23. **Title 40** CFR Part 761. Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Manufacturing, Processing, Distribution in Commerce, and Use Prohibitions [Электрон. ресурс] www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.34.761&rgn=div5 (дата обращения 03.08.2021).

24. **Hazardous** Waste Management System. Burning of Waste Fuel and Used Oil Fuel in Boilers and Industrial Furnaces // Environmental Protection Agency USA. Rules and Regulations. Federal Register. 1985. V. 50. No. 230. [Электрон. ресурс] www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/50fr49164_1.pdf (дата обращения 03.08.2021).

25. **Burning** of Hazardous Waste in Boilers and Industrial Furnaces // Environmental Protection Agency USA. Proposed Rules. Federal Register 1987. V. 52. No. 87. [Электрон. ресурс] www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/52fr16982.pdf (дата обращения 03.08.2021).

26. **Assessment** of the Effects of Combustion of Waste, Oil and Health Effects Associated with the use of Waste Oil as a Dust Suppressant. Ministry for the Environment New Zealand [Электрон. ресурс] www.environment.govt.nz/publications/assessment-of-the-effects-of-combustion-of-waste-oil-and-health-effects-associated-with-the-use-of-waste-oil-as-a-dust-suppressant/ (дата обращения 03.08.2021).

27. **Бернадинер И.М.** Диоксины и другие токсиканты при высокотемпературной переработке и обезвреживании отходов. М.: Издат. дом МЭИ, 2007.

28. **Best** Available Techniques (BAT). Reference Document for Waste Treatment Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) [Электрон. ресурс] www.ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-waste-treatment-industrial-emissions; www.eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=EN (дата обращения 03.08.2021).

29. **Директива № 2010/75/ЕС** Европейского парламента и Совета Европейского Союза «О промышленных выбросах (о комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним)» [Электрон. ресурс] www.base.garant.ru/70161770/#friends (дата обращения 03.08.2021).

30. **Бернадинер М.Н., Шурыгин А.П.** Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. М.: Химия, 1990.

31. **Vermont** Used Oil Analysis and Waste Oil Furnace Emissions Study. Vermont Agency of Natural Resources [Электрон. ресурс] www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/w_oilacr.pdf (дата обращения 03.08.2021).

32. **Pelitli V., Doğan Ö., Köroğlu H.J.** Waste Oil Management: Analyses of Waste Oils From Vehicle Crankcases and Gearboxes [Электрон. ресурс] www.gjesm.net/

bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.29.279&rgn=div5 (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

23. **Title 40** CFR Part 761. Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Manufacturing, Processing, Distribution in Commerce, and Use Prohibitions [Elektron. Resurs] www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.34.761&rgn=div5 (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

24. **Hazardous** Waste Management System. Burning of Waste Fuel and Used Oil Fuel in Boilers and Industrial Furnaces. Environmental Protection Agency USA. Rules and Regulations. Federal Register. 1985;50;230. [Elektron. Resurs] www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/50fr49164_1.pdf (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

25. **Burning** of Hazardous Waste in Boilers and Industrial Furnaces // Environmental Protection Agency USA. Proposed Rules. Federal Register 1987;52;87. [Elektron. Resurs] www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/52fr16982.pdf (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

26. **Assessment** of the Effects of Combustion of Waste, Oil and Health Effects Associated with the use of Waste Oil as a Dust Suppressant. Ministry for the Environment New Zealand [Elektron. Resurs] www.environment.govt.nz/publications/assessment-of-the-effects-of-combustion-of-waste-oil-and-health-effects-associated-with-the-use-of-waste-oil-as-a-dust-suppressant/ (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

27. **Bernadiner I.M.** Dioksiny i Drugie Toksikanty pri Vysokotemperaturnoy Pererabotke i Obezvrezhivanii Otkhodov. M.: Izdat. Dom MEI, 2007. (in Russian).

28. **Best** Available Techniques (BAT). Reference Document for Waste Treatment Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) [Elektron. Resurs] www.ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-waste-treatment-industrial-emissions; www.eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=EN (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

29. **Direktiva № 2010/75/ES** Evropeyskogo Parlamenta i Soveta Evropeyskogo Soyuza «O Promyshlennykh Vybrosakh (o Kompleksnom Predotvrashchenii Zagryazneniya i Kontrole nad nim)» [Elektron. Resurs] www.base.garant.ru/70161770/#friends (Data Obrashcheniya 03.08.2021). (in Russian).

30. **Bernadiner M.N., Shurygin A.P.** Ognevaya Pererabotka i Obezvrezhivanie Promyshlennykh Otkhodov. M.: Khimiya, 1990. (in Russian).

31. **Vermont** Used Oil Analysis and Waste Oil Furnace Emissions Study. Vermont Agency of Natural Resources [Elektron. Resurs] www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/w_oilacr.pdf (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

32. **Pelitli V., Doğan Ö., Köroğlu H.J.** Waste Oil Management: Analyses of Waste Oils From Vehicle Crankcases and Gearboxes [Elektron. Resurs] www.gjesm.net/

article_22148_03e030d8c64c45fd18a362bc6f9d017c.pdf (дата обращения 03.08.2021).

33. **Energy** Management by Recycling of Vehicle Waste Oil in Pakistan [Электрон. ресурс] www.paper.researchbib.com/view/paper/7243 (дата обращения 03.08.2021).

34. **Petrochemical** standards. Edition 2011/2012. [Электрон. ресурс] www.ecolan.com.ru/standard-samples-foreign/4/4-2.pdf (дата обращения 03.08.2021).

35. **Petrochemical** standards. ASTM. AccuStandard is Accredited to ISO Guide 34, ISO/IEC 17025 and Certified to ISO 9001 [Электрон. ресурс] www.weber.hu/Downloads/Standards/AccuStandard_Petrochemicals.pdf (дата обращения 03.08.2021).

36. **Guide to ASTM** Test Methods for the Analysis of Petroleum Products and Lubricants [Электрон. ресурс] www.prime.erpnext.com/files/GuidetoAstmTestMethodsfortheAnalysisofPetroleumProductsandLubricantsSecondEdition.pdf (дата обращения 03.08.2021).

37. **Compendium** of Recycling and Destruction Technologies for Waste Oils [Электрон. ресурс] www.wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8601/IETC_Waste_Oils_Compndium.pdf?sequence=3&isAllowed=y (дата обращения 03.08.2021).

article_22148_03e030d8c64c45fd18a362bc6f9d017c.pdf (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

33. **Energy** Management by Recycling of Vehicle Waste Oil in Pakistan [Elektron. Resurs] www.paper.researchbib.com/view/paper/7243 (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

34. **Petrochemical** standards. Edition 2011/2012. [Elektron. Resurs] www.ecolan.com.ru/standard-samples-foreign/4/4-2.pdf (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

35. **Petrochemical** standards. ASTM. AccuStandard is Accredited to ISO Guide 34, ISO/IEC 17025 and Certified to ISO 9001 [Elektron. Resurs] www.weber.hu/Downloads/Standards/AccuStandard_Petrochemicals.pdf (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

36. **Guide to ASTM** Test Methods for the Analysis of Petroleum Products and Lubricants [Elektron. Resurs] www.prime.erpnext.com/files/GuidetoAstmTestMethodsfortheAnalysisofPetroleumProductsandLubricantsSecondEdition.pdf (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

37. **Compendium** of Recycling and Destruction Technologies for Waste Oils [Elektron. Resurs] www.wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8601/IETC_Waste_Oils_Compndium.pdf?sequence=3&isAllowed=y (Data Obrashcheniya 03.08.2021).

Сведения об авторах:

Кожевников Виталий Анатольевич — старший научный сотрудник ООО «НИИ Транснефть», Москва, e-mail: kozhevnikovva@niitnn.transneft.ru

Попов Станислав Константинович — доктор технических наук, профессор кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей НИУ МЭИ, e-mail: PopovSK@mpei.ru

Information about authors:

Kozhevnikov Vitaliy A. — Senior Researcher in Transneft Research Institute LLC, Moscow, e-mail: kozhevnikovva@niitnn.transneft.ru

Popov Stanislav K. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Innovative Technologies for High-Tech Industries Dept., NRU MPEI, e-mail: PopovSK@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 28.01.2021

The article received to the editor: 28.01.2021