

УДК 620.9:662.92.001.5

ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТРАБОТАННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ КАК ТОПЛИВА

Кожевников Виталий Анатольевич¹,
kozhevnikovva@niitnn.transneft.ru

Попов Станислав Константинович²,
popovsk@mpei.ru

Строгонов Константин Владимирович²,
strogonovkv@mpei.ru

Федюхин Александр Валерьевич²,
fediukhinav@mpei.ru

Валинеева Анна Александровна²,
valineevaaa@mpei.ru

Мотов Егор Вячеславович²,
motovyv@mpei.ru

Малев Сергей Николаевич²,
malevsn@mpei.ru

¹ ООО «НИИ Транснефть»,
Россия, 117186, г. Москва, Севастопольский пр., 47а.

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1.

Актуальность. Отработанные нефтепродукты, образующиеся в различных технологических системах, представляют собой материальный поток, который характеризуется множественностью разнородных составляющих (отработанные масла, нефтешламы, некондиционные жидкие нефтепродукты и др.) и распределенностью источников этих составляющих. Утилизация данного потока может быть реализована с соблюдением экологических нормативов и получением энергосберегающего эффекта путем использования отработанных нефтепродуктов как топлива. Реализация этой перспективы должна строиться на соответствующей нормативной базе.

Цель: систематизированное и полное представление информации, необходимой для эффективного использования отработанных нефтепродуктов в качестве топлива, разработка классификации топлива из отработанных нефтепродуктов на основе анализа литературных данных и результатов экспериментальных исследований.

Объект: отработанные нефтепродукты, к которым относятся отработанные масла, промывочные нефтяные жидкости, а также смеси нефти и нефтепродуктов, образующиеся при зачистке средств хранения, транспортирования, извлекаемые из нефтесодержащих вод.

Методы: анализ теплотехнических свойств отработанных нефтепродуктов для оценки перспектив их энергоэффективного использования в качестве топлива; исследование условий экологически эффективного сжигания отработанных нефтепродуктов в промышленных установках; разработка классификации топлива из отработанных нефтепродуктов.

Результаты. Выполнен анализ требований к отработанным нефтепродуктам как к топливу, которые установлены нормативными документами ряда стран. Приведены результаты исследования теплотехнических характеристик отработанных нефтепродуктов в качестве топлива. Получена аналитическая зависимость низшей теплоты сгорания отработанных нефтепродуктов от кинематической вязкости. Предложена классификация топлива из отработанных нефтепродуктов, которая может быть использована для создания соответствующей нормативной базы.

Ключевые слова:

Отработанные нефтепродукты, котельно-печное топливо, технические условия, классификация топлива, энергосбережение, экологические требования.

Введение

Функционирование множества технологических систем сопровождается образованием существенных объемов отработанных нефтепродуктов (ОНП) [1] различного генеза. В соответствии с действующим законодательством [2], ОНП должны быть утилизированы с обязательным соблюдением экологических нормативов.

Мировая практика обращения ОНП позволяет выделить направления их использования [3–5], представленные на рис. 1.

Такие факторы, как территориальная разрозненность мест образования ОНП, непостоянство количественного образования ОНП и длинные транспортные дистанции до пунктов сбора и переработки ОНП, существенно удорожают процедуры утилизации ОНП.

Потери ценных энергетических ресурсов (в ОНП) сопровождаются расходом моторного топлива на их перевозку и поставку котельных топлив на собственные нужды.

В то же время холодный климат России длительное время года вынуждает потреблять топливо для теплоснабжения в отопительный период и на энерготехнологии. Замещение низкосортных и топочных мазутов на качественное топливо из ОНП сокращает затраты теплоты источников на собственные нужды, увеличивает КПД котельно-печного оборудования, сокращает концентрации вредных веществ в отходящих газах и сужает санитарно-защитные зоны. Анализ [5] приводит к выводу, что в климатических условиях России приоритетом является сжигание ОНП в качестве котельно-печного топлива с получением энергосберегающего эффекта. Такое направле-

ние использования представляется актуальным и требует разработки современных технических решений, характеризующихся экологическим совершенством и энергоэффективностью.

Исследования [5, 6] позволили установить группы очищенных ОНП, характеристики которых могут соответствовать требованиям к топливам как энергетическому ресурсу (рис. 2).



Рис. 1. Направления использования отработанных нефтепродуктов

Fig. 1. Variants of used petroleum products application

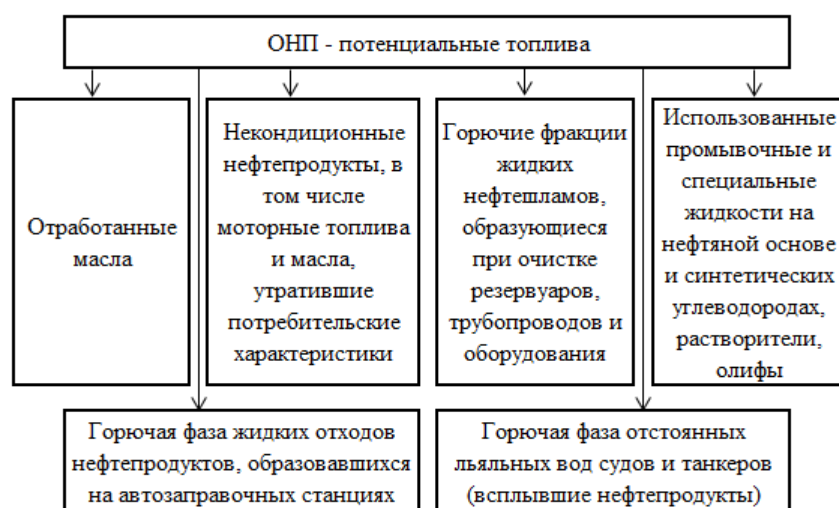


Рис. 2. Группы отработанных нефтепродуктов, потенциально близких по характеристикам к топливу

Fig. 2. Groups of used petroleum products potentially similar in characteristics to fuel

Представленные на рис. 2 ОНП имеют вязкости от 1 до 400 сСт при 50 °С, низшую теплоту сгорания от 40 до 43,5 МДж/кг [5, 6]. Вместе с тем проведенные исследования не дают достаточного представления о теплофизических и теплотехнических свойствах ОНП, рассматриваемых в качестве топлива.

Целью данной работы является систематизированное и полное представление информации, необходимой для эффективного использования ОНП в качестве топлива, создание классификации топлива из ОНП на основе анализа литературных данных и результатов экспериментальных исследований.

Связь состава загрязнителей и свойств нефтяных топлив

Анализ токсичности выбросов при использовании разных видов топлива приведен в монографиях International Agency for Research on Cancer [7, 8]. Результаты исследований Texas Department of Transportation (TxDOT) и Texas Tech University (TTU) с целью изучения углеводородного состава и свойств

отработанных масел в сравнении со свежими маслами, поиска путей их восстановления и продления жизненного цикла представлены в [9].

В материалах исследований Vermont Agency of Natural Resources [10] рассматриваются в качестве топлива отработанные масла от бензиновых и дизельных автомобилей, приводятся данные о составе загрязнителей и эмиссии выбросов при их сжигании в теплогенераторах, описаны методики исследований. Физико-химические свойства тяжелых нефтяных топлив, сведения об их токсикологической, санитарной и экологической опасности представлены в отчете CONCAWE [11]. В публикации Department of the Interior and Geological Survey US [12] представлен анализ содержания загрязнителей в тяжелых нефтяных топливах – мазутах и битумах. Приведено сопоставление осредненного состава и концентраций загрязнителей в этих топливах с маслами. Установлено, что масла являются более предпочтительным видом топлива в сравнении с обычными топливными смесями, мазутами и битумами.

В исследованиях министерства окружающей среды Новой Зеландии [3] приводится оценка выбросов загрязняющих веществ в различных производствах при сжигании ОНП, residual-топлив. Оценка эмиссии выбросов представлена в зависимости от технологий сжигания, типа и мощности сжигающих установок. Результаты исследования отработанных картерных и трансмиссионных масел, проведенные с целью определения их пригодности для регенерации, вторичного использования или сжигания, представлены в [13]. В качестве топливных характеристик изучены температура вспышки и содержание загрязнителей: мышьяка, кадмия, хрома, свинца, галогенов, полихлорированных бифенилов (ПХБ). Проведено сопоставление концентраций загрязнителей с нормами ЕС, стандартами ASTM и данными исследований США. По содержанию галогенов и ПХБ в определенных условиях не выявлено препятствий для сжигания отработанных масел в качестве топлива. Здесь и далее под содержанием галогенов понимается общее количество ионов хлора, йода, брома и фтора.

American Petroleum Institute (API) с участием National Oilheat Research Alliance (NORA) провели крупную аналитическую работу [14] по использованию ОНП. Дан сопоставительный анализ состава загрязнителей и других характеристик основных видов топлива и масел, приведена оценка токсичности. На основе проведенных исследований в США сформирована нормативно-правовая база в области использования ОНП как топлива, зафиксированная в разделе 40 федерального свода правил (Code of Federal Regulations – CFR) Агентства по охране окружающей среды США (части 241, 279, 761 и 260 [15–18]).

Перечни нормируемых загрязняющих веществ, содержащихся в топливах и маслах, приводятся в каталогах American Society for Testing and Materials (ASTM), Petrochemical standards [19, 20]. Международными стандартами [21, 22] содержание ПХБ в ОНП не нормируется. Стандартами России ограничение содержания ПХБ в ОНП также не определено, но для нефти, сжигаемой в котельно-печном оборудовании, содержание хлорорганических соединений, включая ПХБ, установлено до 10 ppm [23].

За последние 30–40 лет по мере совершенствования технологий очистки нефти и нефтепродуктов, производства масел, топлива, нефтяных жидкостей и синтетических нефтепродуктов концентрации загрязнителей снизились многократно, что только повышает ценность ОНП как топлива. Динамика снижения концентрации загрязняющих веществ в маслах иллюстрируется данными табл. 1 [24]. По этой причине концентрации ПХБ и суммарные концентрации галогенов становятся главным критерием применимости ОНП в качестве топлива [8].

Для нефтешламов месторождений и нефтеперерабатывающих заводов состав углеводородов и содержание загрязняющих веществ в виде тяжелых металлов и солей представлены в работах [25–28]. Состав загрязнителей, образующихся в процессах регенерации ОНП, приведен в справочнике [29] министерства природных ресурсов РФ. Близкими к ОНП по составу

и свойствам являются мазуты, дизельные и судовые топлива, требования к которым на территории России изложены в [22].

Таблица 1. Изменение концентрации загрязнителей в маслах за 1980–2000-е гг.

Table 1. Change in the concentration of pollutants in oils for the 1980–2000s

Наименование загрязнителя Pollutant name	Концентрация загрязнителя Pollutant concentration, ppm		
	1980-е г. in 1980s	1990-е г. in 1990s	2000-е г. in 2000s
Мышьяк/Arsenic	20	–	0,06
Барий/Barium	137	1–7	3,4
Кадмий/Cadmium	4	0,3–7	1
Хром/Chrome	38	2–7	4,1
Свинец/Lead	555	20–146	4,1
Цинк/Zinc	707	570–2370	2
Галогены/Halogens	5500	100–440	5,7–7,8

В национальных законодательствах в сфере обращения отходов практикуется разделять все ОНП на «used» (используемые) и «waste» (отходы), при этом устанавливаются свои нормы содержания загрязнителей. Так, например, в CFR США нормируется содержание мышьяка, кадмия, хрома и свинца. В Канаде контролируется содержание в ОНП не хрома, а ртути [30, 31]. Нормативы содержания расширенного перечня металлов в ОНП, разрешенных к сжиганию в Великобритании в качестве котельно-печного топлива, приведены в приложении Processed Fuel Oil (PFO) к стандарту BS 2869 [32], согласно которому допустимая суммарная концентрация металлов составляет 415 ppm (для свежих дистиллированных топлив – 65 ppm). Однако далеко не все вещества, содержащиеся в ОНП, подлежат обязательному контролю нормативами США [33, 34] или других стран.

Анализ представленных материалов иностранных и отечественных исследований, в том числе результатов исследований Национального исследовательского университета «МЭИ» (Россия, г. Москва) – далее НИУ «МЭИ», в сфере нефтяных топлив приводит к выводу о наличии связи вязкости топлив с их теплотой сгорания и другими теплотехническими характеристиками, влияющими на температуру факела и возможности эффективного обезвреживания галогеносодержащих загрязнителей. Выполненный анализ, результаты которого представлены в данной статье, позволил систематизировать и пополнить сведения о теплотехнических характеристиках ОНП как топлива.

Теплотехнические характеристики отработанных нефтепродуктов

На основе опубликованных данных по температурным зависимостям вязкости различных нефтяных топлив установлена связь между диапазонами вязкостей и характерной для этих диапазонов теплотой сгорания топлив [35–37]. Накопленный многолетний опыт исследования различных ОНП как топлива дает основание принять допущение, что нефтепродукты – топлива и отработанные нефтепродукты – с одинаковой вязкостью имеют одинаковую теплоту сгорания. Это позволяет оценить теплоту сгорания ОНП по его вязкости [37].

В исследовании [38] на основе обработки литературных и собственных экспериментальных данных получена аналитическая зависимость нижней теплоты сгорания ОНП Q_l^a (кДж/кг) от кинематической вязкости ν (мм²/с или сСт при 50 °С)

$$Q_l^a = 44000 - 500 \log_2(\nu). \quad (1)$$

Формула справедлива в диапазоне значений кинематической вязкости от 2 до 128 сСт при 50 °С, в котором величина Q_l^a изменяется в диапазоне от 40500

до 43500 кДж/кг. В табл. 2 представлены результаты [38] экспериментального исследования зависимости нижней теплоты сгорания ОНП (строка 2) от кинематической вязкости (строка 1), а также расчетов по формуле (1) (строка 3). Относительное расхождение экспериментальных и расчетных значений Q_l^a не превышает 0,32 % в рассмотренном диапазоне вязкостей (строка 4).

Таблица 2. Сравнение экспериментальных и расчетных значений Q_l^a (Россия)

Table 2. Comparison of experimental and calculated values of Q_l^a (Russia)

№	Наименование показателя Indicator name	Значение показателя/Indicator value								
1	Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт (эксперимент) Kinematic viscosity at 50 °С, cSt (experiment)	358,4	179,2	89,6	44,8	22,4	11,2	5,6	2,8	1,4
2	Q_l^a , кДж/кг (эксперимент) kJ/kg (experiment)	39810	40286	40762	41238	41714	42190	42667	43143	43619
3	Q_l^a , кДж/кг (расчет по (1)) kJ/kg (calculation by (1))	39757	40257	40757	41257	41757	42257	42757	43257	43757
4	Относительное расхождение Relative discrepancy Q_l^a , %	-0,13	-0,07	-0,01	0,05	0,10	0,16	0,21	0,26	0,32

Сопоставим результаты расчета по формуле (1) с характеристиками жидких топлив, опубликованными в различных источниках. В табл. 3–5 приведены данные нормативных документов России (СССР), Великобритании и Германии [39].

Экспериментальные данные, опубликованные в Великобритании [32, 40], дают возможность оценить адекватность формулы (1) в области низких значений кинематической вязкости (табл. 6), тогда как результаты [41] исследования эффективности гидродинамической обработки мазута и приготовления водотопливных эмульсий позволяют провести такой же анализ в области высоких значений кинематической вязкости (табл. 7).

Таблица 3. Сопоставление с данными ГОСТ 10585-99 «Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия»

Table 3. Comparison with the data of SS 10585-99 «Oil fuel. Fuel oil. Specifications»

Наименование показателя Indicator name	Значение показателя для различных марок топлива Value of the indicator for different brands of fuel			
	Ф-5	Ф-12	М-40	М-100
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт Kinematic viscosity at 50 °С, cSt	36,2	89,0	250	580
Содержание воды Water content, %	0,3	0,3	1	1
Зольность/Ash content, %	0,05	0,1	0,12	0,14
Механические примеси Mechanical impurities, %	0,1	0,12	0,5	1
Q_l^a (в пересчете на сухое топливо), кДж/кг in terms of dry fuel), kJ/kg	41454	41454	40740	40530
Q_l^a , кДж/кг (расчет по (1)) kJ/kg (calculation by (1))	41411	40762	40017	39410
Относительное расхождение Relative discrepancy Q_l^a , %	-0,10	-1,70	-1,81	-2,84

Таблица 4. Сопоставление с данными Британского института стандартов BS 2869-57

Table 4. Comparison with the data of the British Standards Institute BS 2869-57

Наименование показателя Indicator name	Топливо для отопления Fuel for heating	Мазуты для промышленных и морских топок Fuel oil for industrial and marine furnaces			
		D	E	F	G
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт Kinematic viscosity at 50 °С, cSt	6	36	125	370	690
Содержание воды Water content, %	0,25	0,5	1	1	1,5
Коксуемость Coking ability, %	0,2	–	–	–	–
Зольность/Ash content, %	0,01	–	–	–	–
Высшая теплота сгорания, кДж/кг Higher heating value, kJ/kg	43157	42738	42319	41900	41481
Q_l^a (в пересчете на сухое топливо), кДж/кг (in terms of dry fuel), kJ/kg	40643	40015	39721	39512	39302
Q_l^a , кДж/кг (расчет по (1)) kJ/kg (calculation by (1))	42708	41415	40517	39734	39285
Относительное расхождение Relative discrepancy Q_l^a , %	4,83	3,38	1,96	0,56	-0,04

Экспериментальные данные США по характеристикам мазутов Residual Fuel Oil [8, 42, 43] представлены в табл. 8.

В НИУ «МЭИ» проведен комплекс исследований теплотехнических свойств образцов ОНП, предоставленных ООО «НИИ Транснефть». Некоторые результаты исследования приведены в табл. 9.

Таблица 5. Сопоставление с данными по мазутам стандарта Германии DIN-51603-60

Table 5. Comparison with data on fuel oils of the German standard DIN-51603-60

Наименование показателя Indicator name	Значение показателя для различных марок топлива Value of the indicator for different brands of fuel			
	EL	L	M	S
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт Kinematic viscosity at 50 °C, cSt	3,5	7	38	450
Коксуемость/Coking ability, %	0,05	2	10	15
Зольность/Ash content, %	0,01	0,04	0,07	0,15
Содержание воды/Water content, %	0,1	0,3	0,5	0,5
Механические примеси Mechanical impurities, %	0,05	0,1	0,25	0,5
Q_i^a (в пересчете на сухое топливо), кДж/кг/(in terms of dry fuel), kJ/kg	41900	41062	40224	39386
Q_i^a , кДж/кг (расчет по (1)) kJ/kg (calculation by (1))	43096	42596	41376	39593
Относительное расхождение Relative discrepancy Q_i^a , %	2,78	3,60	2,78	0,52

Таблица 6. Сопоставление с данными исследований [32, 40] (Великобритания)

Table 6. Comparison with research data [32, 40] (UK)

Наименование показателя Indicator name	Значение показателя для различных марок топлива Value of the indicator for different brands of fuel	
	PFO	LFO
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт Kinematic viscosity at 50 °C, cSt	8	8
Плотность, кг/л/Density, kg/l	0,8978	0,93
Содержание воды/Water content, %	0,54	0,25
Зольность/Ash content, %	0,08	0,04
Содержание серы/Sulfur content, %	1	1
Q_i^a , кДж/л (kJ/l)	38200	39710
Q_i^a , кДж/кг (kJ/kg)	42548	42699
Q_i^a , кДж/кг (расчет по (1)) kJ/kg (calculation by (1))	42500	42500
Относительное расхождение Relative discrepancy Q_i^a , %	-0,11	-0,47

Таблица 7. Сопоставление с данными исследований [41] (Россия)

Table 7. Comparison with research data [41] (Russia)

Наименование показателя Indicator name	Значение показателя для различных марок топлива Value of the indicator for different brands of fuel	
	ИТ	ГТ
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт/Kinematic viscosity at 50 °C, cSt	562,12	572,14
Плотность, кг/л/Density, kg/l	1000,4	1000,2
Содержание воды/Water content, %	0,06	0,24
Коксуемость/Coking ability, %	19,19	19,06
Содержание серы/Sulfur content, %	3,90	3,83
Высшая теплота сгорания, кДж/кг/Higher heating value, kJ/kg	41440	42119
Высшая теплота сгорания (в пересчете на сухое топливо), кДж/кг Higher heating value, kJ/kg (in terms of dry fuel)	41465	42199
Q_i^a (в пересчете на сухое топливо), кДж/кг/(in terms of dry fuel), kJ/kg	39526	40157
Q_i^a , кДж/кг (расчет по (1)) kJ/kg (calculation by (1))	39433	39420
Относительное расхождение Relative discrepancy Q_i^a , %	-0,17	-1,61

В исследовании [38] использовались распылительные форсунки, а также испарительное горелочное устройство для сжигания ОНП, представленное на рис. 3. Топливо (ОНП) подается в емкость – 1. В топливной емкости осуществляется розжиг и крекинг топлива. Первичный воздух на розжиг топлива всасывается под действием разрежения через щелевые зазоры между топливной емкостью и испарительной камерой. Регулирование всаса первичного воздуха осуществляется посредством изменения проходного сечения зазоров для воздуха путем перемещения подвижной топливной емкости в направлении параллельно оси дожигателя. Вторичный воздух подается в горелочное устройство компрессором через фурму – 5, снабженную соплом – 7. Фурма находится в потоке воспламененных газов внутри испарительной камеры, охлаждаясь изнутри потоком вторичного воздуха.

Измерение температуры факела проводилось термомпарами с открытым спаем. Измерения CO_2 , CO , O_2 , NO_x осуществлялись газоанализатором Vario Plus Industrial. Коксуемость определялась по методу Конрадсона (ГОСТ 19932-99), зольность – согласно ГОСТ 1461-75. Кинематическая вязкость определялась с помощью вискозиметра ВЗ-1 согласно ГОСТ 9070-75. Измерения теплоты сгорания ОНП проводились на калориметре ИКА С 2000.

Таблица 8. Сопоставление с данными исследований [8, 42] (США)

Table 8. Comparison with research data [8, 42] (USA)

Наименование показателя Indicator name	Значение показателя для различных марок топлива, Value of the indicator for different brands of fuel	
	RFO-70	RFO-100
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт Kinematic viscosity at 50 °C, cSt	70	100
Q_i^a , кДж/кг (kJ/kg)	40910	40610
Q_i^a , кДж/кг (расчет по (1)) kJ/kg (calculation by (1))	40935	40678
Относительное расхождение Relative discrepancy Q_i^a , %	0,06	0,17

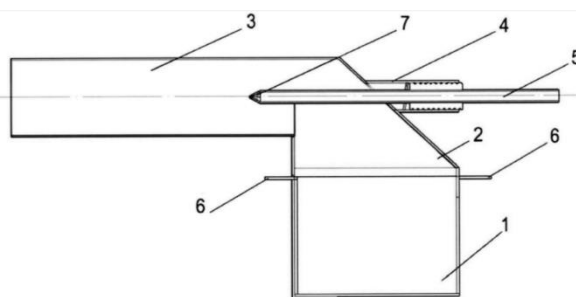


Рис. 3. Конструктивная схема горелочного устройства: 1 – топливная емкость; 2 – испарительная камера; 3 – труба-дожигатель; 4 – втулка регулирования положения воздушной фурмы; 5 – воздушная фурма; 6 – рукоятки для перемещения топливной емкости; 7 – сопло воздушной фурмы

Fig. 3. Design diagram of the burner device: 1 – fuel tank; 2 – evaporation chamber; 3 – afterburner pipe; 4 – air tuyere position control sleeve; 5 – air tuyere; 6 – handles for moving the fuel tank; 7 – air tuyere nozzle

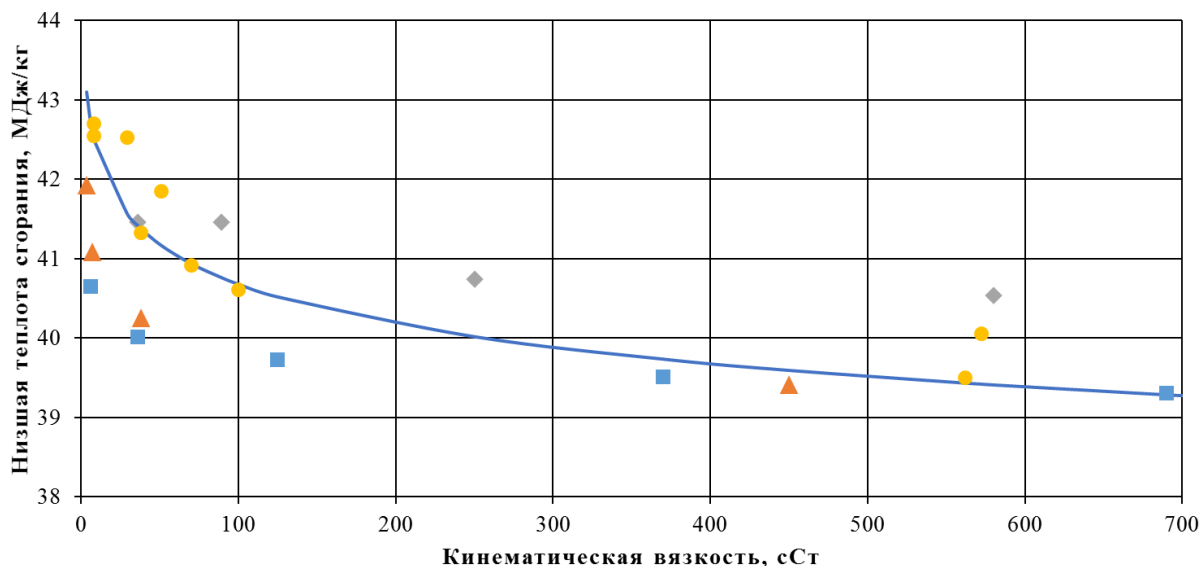


Рис. 4. Сопоставление значений нижней теплоты сгорания (НТС) с результатами расчета по формуле (1): — — расчетная НТС, табл. 2; ● — экспериментальная НТС, табл. 6–9; ◆ — ГОСТ 10585-99, табл. 3; ■ — BS 2869-57, Британский институт стандартов, табл. 4; ▲ — DIN-51603-60, Национальный стандарт Германии, табл. 5.

Fig. 4. Comparison of the lower heating value (LHV) with the calculation results according to the formula (1): — — calculated LHV, table 2; ● — experimental LHV, tables 6–9; ◆ — GOST 10585-99, table 3; ■ — BS 2869-57, British Standards Institute, table 4; ▲ — DIN-51603-60, German National Standard, table 5

Результаты сопоставления расчетных значений низшей теплоты сгорания по формуле (1) с данными, представленными в табл. 3–9, иллюстрируются рис. 4.

Таблица 9. Сопоставление с данными исследований НИУ «МЭИ» и ООО «НИИ Транснефть» (Россия)

Table 9. Comparison with the research data of the National Research Institute «MPEI» and LLC «Research Institute of Transneft» (Russia)

Наименование показателя Indicator name	Значение показателя для различных образцов отработанных нефтепродуктов Value of the indicator for different samples of used petroleum products		
	1	2	3
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт/Kinematic viscosity at 50 °C, cSt	51,08	38,16	29,28
Высшая теплота сгорания, кДж/кг Higher heating value, kJ/kg	44223	43504	45162
Q_i^a , кДж/кг (kJ/kg)	41842	41326	42519
Температура вспышки в открытом тигле (мин) Flash point in an open crucible (min), °C	142	138,1	201
Коксуемость/Coking ability, %	3,33	2,57	0,36
Зольность/Ash content, %	1,03	0,3	0,18
Температура факела при распылительном сжигании Temperature of the torch during spray combustion, °C	1185	1183	1200
Q_i^a , кДж/кг (расчет по (1)) kJ/kg (calculation by (1))	41163	41373	41564
Относительное расхождение Relative discrepancy Q_i^a , %	-1,65	0,11	-2,30

Анализ результатов приводит к выводу о достаточно высокой сходимости расчетных значений Q_i^a с

данными российских и зарубежных источников. Сведения о низшей теплоте сгорания в стандартах BS 2869-57 и DIN-51603-60 выглядят заниженными в рассматриваемом диапазоне вязкости и могут быть устаревшими ввиду ужесточения энергетических и экологических требований к топливам.

Классификация топлива из отработанных нефтепродуктов

Представленная в работах [35–38] зависимость низшей теплоты сгорания топлива из ОНП от его кинематической вязкости, описанная формулой (1), может быть представлена в виде

$$Q_i^a = 44000 - 500N, \quad N = \log_2(v). \quad (2)$$

Диапазону кинематической вязкости от 2 до 128 сСт при 50 °С соответствует, согласно (2), ряд целых значений N от 1 по 7. На этой основе предлагается использовать данные значения N для нумерации сортов нефтяного топлива (НТ) из ОНП (табл. 10).

При выборе из данного ряда тех сортов НТ, которые могут быть использованы как котельно-печное топливо, необходимо учитывать следующие ограничения:

- нефтяные топлива с вязкостью менее 3,5 сСт при 50 °С могут иметь температуру вспышки ниже 38 °С, что не позволяет классифицировать их как топлива из ОНП [5, 9, 17, 20, 22];
- при сжигании нефтяных топлив с вязкостью около 65 сСт и выше не гарантируется возможность достижения минимально допустимой температуры факела 1200 °С [3, 14, 18, 37, 38].

Следовательно, в качестве котельно-печного топлива могут быть непосредственно использованы сорта НТ-2–НТ-6.

Таблица 10. Соответствие низшей теплоты сгорания и кинематической вязкости сорту нефтяного топлива (НТ)

Table 10. Compliance of the lower heating value and kinematic viscosity with the class of petroleum fuel (HT)

Сорт/Class (НТ)	НТ-1	НТ-2	НТ-3	НТ-4	НТ-5	НТ-6	НТ-7
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт/Kinematic viscosity at 50 °С, cSt	2	4	8	16	32	64	128
Низшая теплота сгорания, кДж/кг/Lower heating value, kJ/kg	43500	43000	42500	42000	41500	41000	40500

Условное обозначение котельно-печного топлива из ОНП имеет вид:

НТ–НТС–КВТ–К,

где НТС – низшая теплота сгорания, МДж/кг; КВТ – кинематическая вязкость при 50 °С, мм²/с (сСт); К – категория топлива, I или II: категория I – топливо с «условно чистыми» техническими характеристиками;

категория II – топливо с «условно грязными» техническими характеристиками.

Технические характеристики топлив из ОНП приведены в табл. 11. К категории II отнесены топлива, для которых значения коксуемости, зольности и содержания загрязнителей (механических примесей, воды/рассола, серы, металлов) превышают аналогичные значения для категории I, но не более чем в 2 раза.

Таблица 11. Технические характеристики топлива из ОНП

Table 11. Technical characteristics of used petroleum products

Наименование показателя Indicator name		Значение в зависимости от сорта топлива Value depending on the fuel class				
		НТ-2	НТ-3	НТ-4	НТ-5	НТ-6
Низшая теплота сгорания, МДж/кг, не менее Lower heating value, MJ/kg, not less		43,0	42,5	42,0	41,5	41,0
Кинематическая вязкость при 50 °С, мм ² /с (сСт), не более Kinematic viscosity at 50 °С, mm ² /s (cSt), no more		4	8	16	32	64
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже Flash point in an open crucible, °С, not lower		43	50	57	64	71
Предельная температура фильтруемости, °С, не выше Maximum filterability temperature, °С, not higher		–5	0	0	0	+ 5
Содержание хлорид-ионов, мг/кг, не более Chloride ion content, mg/kg, no more		400	200	100	80	80
Для категории I/For category I						
Коксуемость, мас. %, не более/Coking ability, wt. %, no more		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Зольность, мас. %, не более/Ash content, wt. %, no more		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Доля механических примесей, мас. %, не более Proportion of mechanical impurities, wt. %, no more		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Доля воды/рассола, мас. %, не более Proportion of water/brine, wt. %, no more		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Содержание серы, мас. %, не более Sulfur content, wt.%, no more		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Концентрация металлов, мг/кг, не более Concentration of metals, mg/kg, no more	Высокотоксичных/highly toxic (сумма/total Hg, Cd, As)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
	Токсичных/toxic (сумма/total Ni, Cr, Tl, Sb, Co, Mn, V)	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
	Свинца/lead, Pb	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
	других металлов/other metals (сумма/total Cu, Zn)	100,0	150,0	200,0	250,0	300,0
	Всего/Total	125,0	187,5	250,0	312,5	375,0
Для категории II/For category II						
Коксуемость, мас. %, не более/Coking ability, wt. %, no more		2	3	4	5	6
Зольность, мас. %, не более/Ash content, wt. %, no more		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Доля механических примесей, мас. %, не более Proportion of mechanical impurities, wt. %, no more		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Доля воды/рассола, мас. %, не более Proportion of water/brine, wt. %, no more		0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Содержание серы, мас. %, не более Sulfur content, wt. %, no more		0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Концентрация металлов, мг/кг, не более Concentration of metals, mg/kg, no more	Высокотоксичных/highly toxic (сумма/total Hg, Cd, As)	2	3	4	5	6
	Токсичных/toxic (сумма/total Ni, Cr, Tl, Sb, Co, Mn, V)	28	42	56	70	84
	Свинца/lead, Pb	20	30	40	50	60
	других металлов/other metals (сумма/total Cu, Zn)	200	300	400	500	600
	Всего/Total	250	375	500	625	750

Нормативное содержание галогенов и ПХБ в топливе определяется в соответствии с установленными корреляционными связями с вязкостью и температурами обезвреживания, зависящими от теплоты сгора-

ния и условий сжигания [5, 17, 18, 37, 38]. Условия использования топлива обеспечиваются технологиями сбора и очистки ОНП, подготовки и сжигания данного топлива.

Сжигание топлива из ОНП следует вести с соблюдением температурных режимов обезвреживания га- логеносодержащих загрязнителей, представленных в табл. 12.

Таблица 12. Условия экологически безопасного использования галогеносодержащих сортов топлива из ОНП
Table 12. Conditions for the environmentally safe use of halogen-containing fuels from used petroleum products

Сорт топлива/Fuel grade		НТ-2	НТ-3	НТ-4	НТ-5	НТ-6
Температура факела контрольная, °С, не ниже Control flame temperature, °C, not lower		1350	1300	1250	1200	1150
Содержание галогенов и ПХБ, мг/кг, не более Content of halogens and PCBs, mg/kg, no more	сумма галогенов amount of halogens	500	250	125	100	100
	концентрация ПХБ PCB concentration	25,00	12,50	6,25	5,00	5,00

Надо заметить, что сорт НТ-6 представляют в основном ОНП и мазуты, предназначенные для технологических печей, промышленных, энергетических и судовых агрегатов [44], которые целесообразно оснащать системами дожигания (учитывая пути попадания влаги в зону горения [45]) и/или очистки отходящих газов (например, влажным орошением), обеспечивающих должный уровень экологической безопасности.

Предложенная классификация для топлива из ОНП, будучи закреплённой соответствующим нормативным документом, явится научной основой организации процесса использования отработанных нефтепродуктов как источника энергии для топливопотребляющих установок с соблюдением экологических требований и получением энергосберегающего эффекта.

Заключение

По итогам проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Выполнен анализ требований к отработанным нефтепродуктам как к топливу, которые установлены нормативными документами ряда стран. В качестве топливных характеристик принимаются

во внимание температура вспышки, теплота сгорания и содержание загрязнителей: металлов, галогенов, полихлорированных бифенилов.

2. Выполнен комплекс аналитических и экспериментальных исследований теплотехнических характеристик ОНП: теплоты сгорания, кинематической вязкости, температуры вспышки, коксуемости и зольности. На этой основе получена аналитическая зависимость низшей теплоты сгорания ОНП от кинематической вязкости. Установлена достаточно высокая сходимость расчетных значений теплоты сгорания ОНП с данными российских и зарубежных источников.
3. На основе анализа и систематизации литературных данных, результатов экспериментальных исследований процесса сжигания ОНП в испарительных и распылительных горелочных устройствах сформулированы предложения по классификации топлива из ОНП.
4. Предложенная классификация топлива из ОНП рекомендуется как основа для создания отечественной нормативной документации по энергоэффективному и экологически безопасному сжиганию ОНП в теплотехнических установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 26098-84. Нефтепродукты. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 11 с.
2. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» № 89-ФЗ от 24.06.1998. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901711591> (дата обращения: 25.02.2022).
3. Assessment of the effects of combustion of waste, oil and health effects associated with the use of waste oil as a dust suppressant. Woodward-Clyde. Ministry for the Environment New Zealand. 2000. URL: <https://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/used-oil-dust-suppressant-aug00.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
4. Department of Agriculture, Water and the Environment. Australian Government. URL: <https://www.environment.gov.au/protection/used-oil-recycling> (дата обращения: 25.02.2022).
5. Кожевников В.А., Попов С.К. Энергоэффективное использование отработанных нефтепродуктов как топлива // Вестник МЭИ. – 2020. – № 2. – С. 42–51.
6. 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. – Т. 10. – № 1. – С. 70–83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42447161> (дата обращения: 25.02.2022).
7. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Occupational Exposures in Petroleum Refining: Crude Oil and Major Petroleum Fuels. International Agency for Research on Cancer. – 1989. – V. 45. URL: <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono45.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
8. Fuel Oil Combustion. AP-42. United States Environment Protection Agency. URL: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s03.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
9. Re-refined oil performance and TxDOT used oil collection procedure / J.C. Jones, T.T. Maxwell, R. Narayan, A. Ertas. Final Report Project No. 0-1355. Texas Tech University. 1995. URL: <https://library.ctr.utexas.edu/digitized/texasarchive/phase1/1355-1.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
10. Vermont used oil analysis and waste oil furnace emissions study. Vermont Agency of Natural Resources, U.S. EPA. 1996. Vermont Used Oil Analysis & Waste Oil Furnace Emission Study (epa.gov). URL: https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/w_oilacr.pdf (дата обращения: 25.02.2022).
11. Heavy fuel oils. Prepared by CONCAWE's Petroleum Products and Health Management Groups. Brussels, 1998. URL: https://clui-n.org/download/contaminantfocus/dnapl/Toxicology/concawe_heavy_fuel_oils_2002-00198-01-E.pdf (дата обращения: 25.02.2022).
12. Meyer R.F., Attanasi E.D., Freeman P.A. Heavy oil and natural bitumen resources in geological basins of the world. U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1084. 2007. URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2007/1084/OF2007-1084v1.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
13. Pelitli V., Doğan Ö., Köroğlu H.J. Waste oil management: analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes // Global J. Environ. 2017. URL: https://www.gjesm.net/article_22148_03e030d8c64c45fd18a362bc6f9d017c.pdf (дата обращения: 25.02.2022).

14. Life cycle assessment of used oil management. Prepared for the American Petroleum Institute. 2017. URL: <https://www.api.org/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Publications/LCA-of-Used-Oil-Mgmt-ERM-10012017.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
15. Title 40 CFR part 241. Solid Wastes Used as Fuels or Ingredients in Combustion Units. Electronic Code of Federal Regulations. USA. URL: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=b656ab603496daf6d620241043222e6a&mc=true&node=pt40.27.241&rgn=div5> (дата обращения: 25.02.2022).
16. Title 40 CFR part 260. Hazardous Waste Management System: General. Electronic Code of Federal Regulations. USA. URL: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=b656ab603496daf6d620241043222e6a&mc=true&node=pt40.28.260&rgn=div5> (дата обращения: 25.02.2022).
17. Title 40 CFR part 279. Standards for the Management of Used Oil. Electronic Code of Federal Regulations. USA. URL: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.29.279&rgn=div5> (дата обращения: 25.02.2022).
18. Title 40 CFR part 761. Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Manufacturing, Processing, Distribution in Commerce, and Use Prohibitions. Electronic Code of Federal Regulations. USA. URL: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.34.761&rgn=div5> (дата обращения: 25.02.2022).
19. Petrochemical standards. CONOSTAN. Edition 2011/2012. URL: <http://www.ecolan.com.ru/standard-samples-foreign/4/4-2.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
20. Petrochemical standards. ASTM. AccuStandard is accredited to ISO Guide 34, ISO/IEC 17025 and certified to ISO 9001. 2015. URL: https://weber.hu/Downloads/Standards/AccuStandard_Petrochemicals.pdf (дата обращения: 25.02.2022).
21. ГОСТ 32510-2013 (ISO 8217). Топлива судовые. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.
22. Технический регламент Таможенного союза 013/2011. О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902307833> (дата обращения: 25.02.2022).
23. ГОСТ 31378-2009. Нефть. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2012. – 11 с.
24. Hassan Ali Durrani. Energy management by recycling of vehicle waste oil in Pakistan // International Journal of Scientific Engineering and Technology. – 2013. – V. 2. – P. 928–931. URL: <https://www.ijset.com/publication/v2/173.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
25. Цомбуева Б.В. Влияние деятельности нефтеперерабатывающего комплекса на загрязнение земель юго-востока Республики Калмыкии: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Иваново, 2017. – 16 с.
26. Тыныбаева Т.Г. Мониторинг загрязнения почв на газонефтяном месторождении Северные Бузачи (Казахстан): автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М., 2006. – 28 с.
27. Шпербер Е.Р. Разработка комплекса природоохранных технологий переработки отходов НПЗ Краснодарского края: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2016. – 48 с.
28. Шпербер Д.Р. Разработка ресурсосберегающих технологий переработки нефтешлама: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 2015. – 23 с.
29. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям по обращению с отходами. Министерство природных ресурсов России. 2011. URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/metodicheskie_dokumenty/nailuchshie_dostupnye_tekhnologii/ (дата обращения: 25.02.2022).
30. Code of Practice for Energy Recovery. 2005. URL: <http://www.qp.alberta.ca/documents/codes/ENERGY.PDF> (дата обращения: 25.02.2022).
31. Determination of mercury and other trace elements in home heating oil used in New York State / M. Ahmadi, J. Graham, L. Shields, P.J. Miller // Energy Fuels. – 2018. – V. 32. – P. 44–54.
32. BSI BS 2869-2017 Specification Fuel oils for agricultural, domestic and industrial engines and boilers. Processed Fuel Oil (PFO) End of waste criteria for the production and use of processed fuel oil from waste lubricating oils. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296420/geh0211btmo-e-e.pdf (дата обращения: 25.02.2022).
33. 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. – № 230. URL: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/50fr49164_1.pdf (дата обращения: 25.02.2022).
34. Burning of hazardous waste in boilers and industrial furnaces. Environmental Protection Agency USA. Proposed Rules. Federal Register. – 1987. – V. 52. – № 87. URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/52fr16982.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
35. Кожевников В.А., Попов С.К. Разработка нормативной базы для энергоэффективного использования отработанных нефтепродуктов в качестве котельно-печного топлива // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла: сб. докл. под общ. ред. д-ра техн. наук Г.А. Рябова. V Международная научно-техническая конференция. – М.: ОАО «ВТИ», 2020. – С. 124–130.
36. Kozhevnikov V.A., Popov S.K. Energy efficient employment of Used Petroleum Products as fuel based on environmental norms // 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – 2021. – P. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388076.
37. Кожевников В.А., Попов С.К. Теплотехнические и экологические характеристики сжигания отработанных нефтепродуктов в промышленных установках // Вестник МЭИ. – 2022. – № 1. – С. 39–50.
38. Кожевников В.А. Повышение энергетической и экологической эффективности объектов транспорта нефти за счет использования отработанных нефтепродуктов в качестве топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2021. – 20 с.
39. Нефтепродукты. Свойства, качество, применение: справочник / под ред. проф. Б.В. Лосикова. – М.: Химия, 1966. – 776 с.
40. SEPA: Processed Fuel Oil. RE-AN International Technology Services. Ian Gillespie MSc, BSc (Hons), PG Dip, Env Eng, M.I.E.I Report. 1/8/2012. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/production-and-use-of-processed-fuel-oil-from-waste-lubricating-oils> (дата обращения: 25.02.2022).
41. Исследование эффективности гидродинамической обработки мазута и приготовления водотопливных эмульсий на установке ВКИ. URL: <https://additive.spb.ru/vte-issled.html> (дата обращения: 25.02.2022).
42. McDonald R. Evaluation of gas, oil and wood pellet fueled residential heating system emissions characteristics. Brookhaven National laboratory. Energy Sciences and Technology Department Energy Resources Division. 2009. URL: <https://www.bnl.gov/isd/documents/71376.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
43. The bottom of the barrel: how the dirtiest heating oil pollutes our air and harms our health. Environmental Defense Fund & Urban Green Council. 2009. URL: https://www.edf.org/sites/default/files/10085_EDF_Heating_Oil_Report.pdf (дата обращения: 25.02.2022).
44. Правила технической эксплуатации дизелей. – С.-Пб.: Гипрорыбфлот, 1999. – 92 с. URL: https://trans-service.org/ru.php?section=info&page=s_s_u&subpage=sud_dvig_10-11 (дата обращения: 25.02.2022).
45. Росляков П.В., Проскурин Ю.В., Кожевников В.А. Моделирование процесса горения нефти с подмесом подтоварной воды в жаротрубных котлах // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 2. – С. 94–101. DOI: 10.28999/2541-9595-2017-7-2-94-101

Поступила 13.07.2022 г.

Информация об авторах

Кожевников В.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник ООО «НИИ Транснефть».

Попов С.К., доктор технических наук, профессор кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ».

Строгонов К.В., кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ».

Федюхин А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры промышленных теплоэнергетических систем Национального исследовательского университета «МЭИ».

Валинеева А.А., старший преподаватель кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ».

Мотов Е.В., ведущий инженер кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ».

Малев С.Н., инженер кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ».

UDC 620.9:662.92.001.5

OPPORTUNITIES AND PROSPECTS FOR APPLICATION OF USED PETROLEUM PRODUCTS AS FUEL

Vitaly A. Kozhevnikov¹,
kozhevnikovva@niitnn.transneft.ru

Stanislav K. Popov²,
popovsk@mpei.ru

Konstantin V. Strogonov²,
strogonovkv@mpei.ru

Alexander V. Fedyukhin²,
fedyukhinav@mpei.ru

Anna A. Valineeva²,
valineevaaa@mpei.ru

Egor V. Motov²,
motovyv@mpei.ru

Sergey N. Malev²,
malevsn@mpei.ru

¹ Transneft Research Institute LLC,
47a, Sevastopolskiy avenue, Moscow, 117186, Russia.

² National Research University «MPEI»,
14, bld. 1, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russia.

Relevance. Used petroleum products formed in various technological systems represent a material flow, which is characterized by a multiplicity of heterogeneous components (used oils, oil sludge, substandard liquid petroleum products, etc.) and the distribution of sources of these components. Utilization of this stream can be implemented in compliance with environmental regulations and obtaining an energy-saving effect by applying used petroleum products as fuel. The implementation of this perspective should be based on an appropriate regulatory framework.

Objective: systematic and complete presentation of the information necessary for the effective spend of used petroleum products as fuel, development of a classification of fuel from used petroleum products based on the analysis of literature data and the results of experimental studies.

Object: used petroleum products, which include used oils, flushing oil liquids, as well as mixtures of oil and petroleum products formed during the cleaning of storage and transportation facilities, extracted from oil-containing waters.

Methods: analysis of the thermal properties of used petroleum products to assess the prospects for their energy-efficient use as fuel; study of the conditions for environmentally efficient combustion of used petroleum products in industrial installations; development of fuel classification from used petroleum products.

Results. The authors carried out the analysis of the requirements for used petroleum products as fuel, which are established by regulatory documents of a number of countries. The results of the study of the thermal characteristics of used petroleum products as fuel are presented. The analytical dependence of the lower heating value of used petroleum products on the kinematic viscosity is obtained. The classification of fuel from used petroleum products is proposed, which can be used to create an appropriate regulatory framework.

Key words:

Used petroleum products, boiler and furnace fuel, technical conditions, fuel classification, energy saving, environmental requirements.

REFERENCES

1. GOST 26098-84. Nefteprodukty. Terminy i opredeleniya [State standard 26098-84. Petroleum products. Terms and definitions]. Moscow, StandartInform Publ., 2010. 11 p.
2. Federalny zakon «Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya» № 89-FZ ot 24.06.1998 [The federal law of 24.06.1998 «On Production and Consumption Waste» N 89-FZ of 24.06.1998]. (1998, 24 June). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901711591> (accessed 02/25/2022).
3. Assessment of the effects of combustion of waste, oil and health effects associated with the use of waste oil as a dust suppressant. Woodward-Clyde. Ministry for the Environment New Zealand. 2000. Retrieved from <https://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/used-oil-dust-suppressant-aug00.pdf> (дата обращения: 25.02.2022).
4. Assessment of the effects of combustion of waste, oil and health effects associated with the use of waste oil as a dust suppressant. Woodward-Clyde. Ministry for the Environment New Zealand. 2000. Available at: <https://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/used-oil-dust-suppressant-aug00.pdf> (accessed 25 February 2022).
5. Department of Agriculture, Water and the Environment. Australian Government. Available at: <https://www.environment.gov.au/protection/used-oil-recycling> (accessed 25 February 2022).
6. Kozhevnikov V.A., Popov S.K. Energy efficient use of waste petroleum products as fuel. *Bulletin of MPEI*, 2020, no. 2, pp. 42–51. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-2-42-51>
7. Nikolaeva, A.V., Kozhevnikov V.A., Chernykh V.A. Analiz potentsiala ispolzovaniya otrabotannykh nefteproduktov na sobstvennye nuzhdy v organizatsionnykh sistemakh «Transneft» [Analysis of the potential use of used oil products for their self-needs in the organizations of the Transneft system]. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 70–83. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42447161> (accessed 25 February 2022).
8. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Occupational Exposures in Petroleum Refining; Crude Oil and Major Petroleum Fuels. *International Agency for Research on Cancer*, 1989, vol. 45. Available at: <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono45.pdf> (accessed 25 February 2022).
9. Fuel Oil Combustion. AR-42. *United States Environment Protection Agency*. Available at: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s03.pdf> (accessed 25 February 2022).
10. Jones J.C., Maxwell T.T., Narayan R., Ertas A. *Re-refined oil performance and TxDOT used oil collection procedure*. Final Report Project No. 0-1355. Texas Tech University. 1995. URL: <https://library.ctr.utexas.edu/digitized/texasarchive/phase1/1355-1.pdf> (accessed 25 February 2022).
11. *Vermont used oil analysis and waste oil furnace emissions study*. Vermont Agency of Natural Resources, U.S. EPA. 1996. Available at: https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/w_oilacr.pdf (accessed 25 February 2022).

12. *Heavy fuel oils*. Prepared by CONCAWE's Petroleum Products and Health Management Groups. Brussels. 1998. Available at: https://clu-in.org/download/contaminantfocus/dnapl/Toxicology/concawe_heavy_fuel_oils_2002-00198-01-E.pdf (accessed 25 February 2022).
13. Meyer R.F., Attanasi E.D., Freeman P.A. Heavy oil and natural bitumen resources in geological basins of the world. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1084*. 2007. Available at: <https://pubs.usgs.gov/of/2007/1084/OF2007-1084v1.pdf> (accessed 25 February 2022).
14. Pelitli V., Doğan Ö., Köroğlu H.J. Waste oil management: analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes. *Global J. Environ.* 2017. Available at: https://www.gjesm.net/article_22148_03e030d8c64c45fd18a362bc6f9d017c.pdf (accessed 25 February 2022).
15. *Life cycle assessment of used oil management*. Prepared for the American Petroleum Institute. 2017. Available at: <https://www.api.org/~media/Files/Certification/Engine-Oil-Diesel/Publications/LCA-of-Used-Oil-Mgmt-ERM-10012017.pdf> (accessed 25 February 2022).
16. Title 40 CFR part 241. Solid Wastes Used as Fuels or Ingredients in Combustion Units. *Electronic Code of Federal Regulations*. USA. Available at: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=b656ab603496daf6d620241043222e6a&mc=true&node=pt40.27.241&rgn=div5> (accessed 25 February 2022).
17. Title 40 CFR part 260. Hazardous Waste Management System: General. *Electronic Code of Federal Regulations*. USA. Available at: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=b656ab603496daf6d620241043222e6a&mc=true&node=pt40.28.260&rgn=div5> (accessed 25 February 2022).
18. Title 40 CFR part 279. Standards for the Management of Used Oil. *Electronic Code of Federal Regulations*. USA. Available at: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.29.279&rgn=div5> (accessed 25 February 2022).
19. Title 40 CFR part 761. Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Manufacturing, Processing, Distribution in Commerce, and Use Prohibitions. *Electronic Code of Federal Regulations*. USA. Available at: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=a6739eadc899514c81d8e3781bb37e7e&mc=true&node=pt40.34.761&rgn=div5> (accessed 25 February 2022).
20. *Petrochemical standards. CONOSTAN. Edition 2011/2012*. Available at: <http://www.ecolan.com.ru/standard-samples-foreign/4/4-2.pdf> (accessed 25 February 2022).
21. *Petrochemical standards*. ASTM. Accessestandard is accredited to ISO Guide 34, ISO/IEC 17025 and certified to ISO 9001. 2015. Available at: https://weber.hu/Downloads/Standards/AccuStandard_Petrochemicals.pdf, http://www.amchro.com/accu/Master_Catalog_Petrochemical_Section.pdf (accessed 25 February 2022).
22. *GOST 32510-2013 (ISO 8217). Topлива sudovye. Tekhnicheskie usloviya* [State standard 32510-2013 (ISO 8217). Marine fuels. Technical conditions]. Moscow, StandartInform Publ., 2014. 15 p.
23. *Technical Regulations of the Customs Union 013/2011*. About the requirements for automotive and aviation gasoline, diesel and marine fuel, jet fuel and fuel oil. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902307833> (accessed 25 February 2022).
24. *GOST 31378-2009. Neft. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State standard 31378-2009. Oil. General technical conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 11 p.
25. Hassan Ali Durrani. Energy management by recycling of vehicle waste oil in Pakistan. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2013, vol. 2, pp. 928–931. Available at: <https://www.ijset.com/publication/v2/173.pdf> (accessed 25 February 2022).
26. Tsombueva B.V. *Vliyaniye deyatelnosti neftepererabatyvayushchego kompleksa na zagryazneniye zemel yugo-vostoka Respubliki Kalmykii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Impact of the oil refining complex on the pollution of the lands of the south-east of the Republic of Kalmykia. Cand. Diss. Abstract]. Ivanovo, 2017. 16 p.
27. Tynybayeva T.G. *Monitoring zagryazneniya pochv na gazoneftyanom mestorozhdenii Severnyye Buzachi (Kazakhstan)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Monitoring of soil pollution at the Severnyye Buzachi gas and oil field (Kazakhstan). Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2006. 28 p.
28. Shperber E.R. *Razrabotka kompleksa prirodookhrannykh tekhnologiy pererabotki otkhodov NPZ Krasnodarskogo kraya*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Development of a complex of environmental technologies for processing waste from refineries of the Krasnodar Territory. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2016. 48 p.
29. Shperber D.R. *Razrabotka resursosberegayushchikh tekhnologiy pererabotki nefteshlama*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Development of resource-saving technologies for oil sludge processing. Cand. Diss. Abstract]. Krasnodar, 2015. 23 p.
30. *Spravochny dokument po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam po obrashheniyu s otkhodami. Ministerstvo prirodnnykh resursov Rossii* [Reference document on the best available technologies for waste management. Ministry of Natural Resources of Russia]. 2011. Available at: http://www.mnr.gov.ru/docs/metodicheskie_dokumenty/nailuchshie_dostupnye_tekhnologii (accessed 25 February 2022).
31. *Code of Practice for Energy Recovery*. 2005. Available at: <http://www.qp.alberta.ca/documents/codes/ENERGY.PDF> (accessed 25 February 2022).
32. Ahmadi M., Graham J., Shields L., Miller P.J. Determination of mercury and other trace elements in home heating oil used in New York State. *Energy Fuels*, 2018, vol. 32, pp. 44–54.
33. *BSI BS 2869-2017 Specification Fuel oils for agricultural, domestic and industrial engines and boilers*. Processed Fuel Oil (PFO) End of waste criteria for the production and use of processed fuel oil from waste lubricating oils. Available at: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296420/geho0211btmo-e-e.pdf (accessed 25 February 2022).
34. *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. Vol. 50, no. 230. Available at: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/50fr49164_1.pdf (accessed 25 February 2022).
35. *Burning of hazardous waste in boilers and industrial furnaces*. Environmental Protection Agency USA. Proposed Rules. Federal Register. 1987. Vol. 52, no. 87. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/52fr16982.pdf> (accessed 25 February 2022).
36. Kozhevnikov V.A., Popov S.K. *Razrabotka normativnoy bazy dlya energoeffektivnogo ispolzovaniya otrabotannykh nefteproduktov v kachestve kotelno-pechnogo topliva* [Development of a regulatory framework for the energy-efficient use of spent petroleum products as boiler and furnace fuel]. *Ispolzovanie tverdykh topliv dlya effektivnogo i ekologicheskogo chistogo proizvodstva elektroenergii i tepla. Sbornik dokladov pod obshchey redaktsiyey Dokt. nauk G.A. Ryabova. V Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [Use of solid fuels for efficient and environmentally friendly production of electricity and heat. Collection of reports under the general editorship of Dr. Sc. G.A. Ryabov. V International Scientific and Technical Conference]. Moscow, JSC «VTI» Publ., 2020. pp. 124–130.
37. Kozhevnikov V.A., Popov S.K. Energy efficient employment of Used Petroleum Products as fuel based on environmental norms. *3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2021, pp. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388076.
38. Kozhevnikov V.A., Popov S.K. Thermal and environmental characteristics of spent petroleum product combustion in industrial plants. *Bulletin of MPEI*, 2022, no. 1, pp. 39–50. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-1-39-50>.
39. Kozhevnikov V.A. *Povysheniye energeticheskoy i ekologicheskoy effektivnosti obektov transporta nefii za schet ispolzovaniya otrabotannykh nefteproduktov v kachestve topliva*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the energy and environmental efficiency of oil transportation facilities through the use of spent petroleum products as fuel. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2021. 20 p.
40. *Svoystva, kachestvo, primeneniye: spravochnik* [Petroleum products. Properties, quality, application: reference]. Ed. by prof. B.V. Losikov. Moscow, Khimiya Publ., 1966. 776 p.

41. *SEPA: Processed Fuel Oil. RE-AN International Technology Services*. Ian Gillespie MSc, BSc (Hons), PG Dip, Env Eng, M.I.E.I Report. 1/8/2012. Available at: <https://www.gov.uk/government/publications/production-and-use-of-processed-fuel-oil-from-waste-lubricating-oils> (accessed 25 February 2022).
42. *Issledovanie effektivnosti gidrodinamicheskoy obrabotki mazuta i prigotovleniya vodotoplivnykh emulsiy na ustanovke VKI* [Investigation of the effectiveness of hydrodynamic treatment of fuel oil and preparation of water-fuel emulsions at the VKI installation]. Available at: <https://additive.spb.ru/vte-issled.html> (accessed 25 February 2022).
43. McDonald R. *Evaluation of gas, oil and wood pellet fueled residential heating system emissions characteristics*. Brookhaven National laboratory. Energy Sciences and Technology Department Energy Resources Division. 2009. Available at: <https://www.bnl.gov/isd/documents/71376.pdf> (accessed 25 February 2022).
44. *The bottom of the barrel: how the dirtiest heating oil pollutes our air and harms our health*. Environmental Defense Fund & Urban Green Council. 2009. Available at: https://www.edf.org/sites/default/files/10085_EDF_Heating_Oil_Report.pdf (accessed 25 February 2022).
45. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii dizeley* [Rules for the technical operation of diesel engines]. St. Petersburg, Giprorybflot Publ., 1999. 92 p. Available at: https://trans-service.org/ru.php?section=info&page=s_u&subpage=sud_dvig_10-11 (accessed 02/25/2022).
46. Roslyakov P.V., Proskurin Yu.V., Kozhevnikov V.A. Simulation of the oil burning process with the admixture of bottom water in fire-tube boilers. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2017, no. 2, pp. 94–101. In Rus. DOI: 10.28999/2541-9595-2017-7-2-94-101.

Received: 13 July 2022.

Information about the authors

Vitaly A. Kozhevnikov, Cand. Sc., senior researcher, Transneft Research Institute LLC.

Stanislav K. Popov, Dr. Sc., professor, National Research University «MPEI».

Konstantin V. Stroganov, Cand. Sc., associate professor, National Research University «MPEI».

Alexander V. Fedyukhin, Cand. Sc., associate professor, National Research University «MPEI».

Anna A. Valineeva, senior lecturer, National Research University «MPEI».

Egor V. Motov, leading engineer, National Research University «MPEI».

Sergey N. Malev, engineer, National Research University «MPEI».