Русскоязычный перевод статьи DOI: 10.3390/en14248422 *

Исследование несовместимости остатков судового топлива: анализ конкретного случая с использованием методов машинного обучения

Р.Р. СУЛТАНБЕКОВ, И.И. БЕЛОГЛАЗОВ ✉, Ш.Р. ИСЛАМОВ, Мак ЧЕНГ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
✉ *Beloglazov_II@pers.spmi.ru*

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Sultanbekov, R.; Beloglazov, I.; Islamov, S.; Ong, M.C. Exploring of the Incompatibility of Marine Residual Fuel: A Case Study Using Machine Learning Methods. Energies 2021, 14, 8422. https://doi.org/10.3390/en14248422

Аннотация: Обеспечение судов качественным топливом с пониженным содержанием SO_x является приоритетной задачей. Морские остатки топлива являются одним из основных источников загрязнения атмосферы при эксплуатации судов и морских танкеров. Поэтому Международная морская организация (ММО) установила жесткие нормативы по содержанию серы в судовом топливе. Одним из возможных технологических решений, позволяющих соблюсти ограничения по содержанию серы, является использование смесевых типов топлива. Однако оно сопряжено с риском несовместимости ингредиентов. В данной статье рассматривается новый подход к изучению активного осаждения остаточных и смесевых типов топлив. Оценка процесса седиментации при смешивании, хранении и транспортировке судовых типов топлива производится на основе разработанных авторами оценочных трехмерных схем. В попытке найти оптимальное решение были проведены исследования по определению влияния состава судового остаточного топлива на образование осадка с помощью алгоритмов машинного обучения. Таким образом, предложена модель, которая может быть использована для прогнозирования несовместимости топливных композиций, а также процессов осадкообразования. Модель может быть использована для определения содержания осадка в смешанных морских остаточных топливах с требуемой концентрацией серы.

Ключевые слова: машинное обучение; смешивание типов топлива; групповой состав; седиментация; судовые остатки топлива.

Exploring of the Incompatibility of Marine Residual Fuel: A Case Study Using Machine Learning Methods

Radel R. SULTANBEKOV, Ilia I. BELOGLAZOV ✉, Shamil R. ISLAMOV and Muk CHEN ONG
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
✉ *Beloglazov_II@pers.spmi.ru*

Abstract: Providing quality fuel to ships with reduced SOx content is a priority task. Marine residual fuels are one of the main sources of atmospheric pollution during the operation of ships and sea tankers. Hence, the International Maritime Organization (IMO) has established strict regulations for the sulfur content of marine fuels. One of the possible technological solutions allowing for adherence to the sulfur content limits is use of mixed fuels. However, it carries with it risks of ingredient incompatibilities. This article explores a new approach to the study of active sedimentation of residual and mixed fuels. An assessment of the sedimentation process during mixing, storage, and transportation of marine fuels is made based on estimation three-dimensional diagrams developed by the authors. In an effort to find the optimal solution, studies have been carried out to determine the influence of marine residual fuel compositions on sediment formation via machine learning algorithms. Thus, a model which can be used to predict incompatibilities in fuel compositions as well as sedimentation processes is proposed. The model can be used to determine the sediment content of mixed marine residual fuels with the desired sulfur concentration.

Keywords: marine residual fuels; mixing fuels; group composition; sedimentation; machine learning.

1. Введение

Выбросы парниковых газов с судов, особенно оксидов серы (SO_x), оказывают серьезное воздействие на здоровье людей, морскую среду и природные ресурсы. Десятки стран, в том числе Китай и ЕС, уже заявили о готовности к 2050-2060 гг. достичь на своей территории углеродной нейтральности, т.е. свести к нулю разницу между выбросами парниковых газов и их поглощением

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

с учетом возможностей экосистемы региона. ЕС одним из первых предложил переход к углеродно-нейтральной экономике к 2050 году в рамках европейского «зеленого курса» [1]. Для достижения цели декарбонизации и устойчивого развития ТЭК в России приняты беспрецедентные законодательные меры [2-6], направленные на налоговые льготы для отечественных производителей, что стимулирует исследовательские проекты, направленные на снижение выбросов вредных газов [7-10]. В ЕС уже введены квоты на выбросы CO_2, начала действовать Европейская система торговли выбросами. Трансграничное углеродное регулирование для ЕС и США становится способом сохранения рынков судового топлива ЕС и США и частью протекционистской политики. Российскую экономику ожидает сложный компромисс между признанием глобальных принципов экологической, социальной и управленческой ответственности и реалиями углеродоемкой экономики. Наиболее подверженными климатическим воздействиям окажутся нефть и различные виды топлива. Компания BP считает [11], что при сохранении статус-кво, пик мирового потребления нефти был достигнут уже в 2019 году, хотя ОПЕК ожидает его к 2040 году [12], а Международное энергетическое агентство – после 2030 года [13].

В январе 2020 года Международная морская организация (ММО) вводит новые требования к содержанию серы в судовом топливе [14]. Поэтому контроль выбросов CO_x и SO_x является одной из основных задач морской индустрии [15,16]. В результате допустимое содержание серы в судовом топливе снизилось в 7 раз – с 3,5 до 0,5 по массе. За период 2007-2012 гг. среднегодовые выбросы SO_x, по оценкам ММО, составили 11,3 млн т, что соответствует 13 % мировых выбросов SO_x [17]. В портовых городах выбросы оксида серы с судов часто являются основным источником загрязнения [18-20]. Кроме того, выбросы SO_x с судов распространяются в атмосферу на несколько сотен километров и способствуют ухудшению качества воздуха на суше, даже если они попадают в море [21]. В последнее время ММО активно регулирует правила загрязнения морской среды и вводит зоны контроля выбросов [22,23].

Судовладельцы должны иметь возможность обеспечить соответствие содержания серы установленным ограничениям на основе существующих законов. В настоящее время существует три технологически реализуемых решения по снижению выбросов SO_x, которые могут быть использованы на судах: использование сжиженного природного газа в качестве топлива, установка газоочистителей и морское остаточное топливо с низким содержанием серы. В данной статье рассматривается третий способ – использование судового топлива с содержанием серы до 0,5 масс. %.

В настоящее время нефтеперерабатывающие заводы России не в состоянии полностью обеспечить себя новым видом топлива, так как это требует значительных финансовых вложений и в ряде случаев экономически не выгодно [24,25]. Поэтому, чтобы удовлетворить спрос на новый вид судового топлива, бункерные компании активно занимаются операциями по получению смешанных топлив для достижения необходимых показателей качества. Сегодня наблюдается резкое увеличение доли смешанных топлив для судовых установок. В результате возрастают риски проявления несовместимости топлива, вызывающие активное отстаивание [26].

В связи с этим при хранении, транспортировке и производстве данная проблема становится чрезвычайно актуальной [27-31]. Максимально допустимое содержание общего суммарный потенциала осадка (СПО) в судовом топливе составляет 0,1 масс. % в соответствии с ИСО 8217. Следует отметить, что даже при смешивании топлив одной и той же марки существуют риски несовместимости из-за различий в составе [32]. Несовместимость остаточных топлив проявляется из-за возникновения сильных межмолекулярных взаимодействий, которые обусловлены изменением группового состава, а также изменением соотношения концентраций высокомолекулярных соединений остаточных топлив. Все это способствует образованию ассоциатов молекул, объемных коллоидных частиц различной формы и структуры [33,34].

Нами были проведены исследования по определению стабильности через показатель ксилольного эквивалента. Он характеризует устойчивость судового топлива к расслоению при хранении, транспортировке и эксплуатации, однако точных зависимостей влияния состава не получено, так как выбранный показатель ксилольного эквивалента не позволяет определить степень осаждения [35].

Также, основываясь на производственных и экспериментальных данных, мы провели исследования влияния ароматических углеводородов на осаждение асфальтенов. Было установлено, что увеличение доли ароматических углеводородов снижает седиментацию. Однако влияние парафинов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

на осаждение асфальтенов не рассматривалось, поэтому требуются более детальные исследования в этом направлении [36, 37]. На основе экспериментальных исследований нами получены и обоснованы зависимости влияния н-парафинов (от 55 до 70 масс. %) при конкретных значениях содержания асфальтенов (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 масс. %) [38].

В данной статье ставится задача расширить возможности применения результатов, полученных с помощью широко апробированных методов машинного обучения [39]. Все это позволяет с высокой степенью достоверности определять риски несовместимости в рассматриваемом диапазоне (но не при конкретных значениях содержания асфальтенов и н-парафинов).

Для выбора наиболее эффективного алгоритма классификации/регрессии для исследуемой задачи протестирован достаточно большой набор алгоритмов. Протестированные методы можно разделить на три семейства: деревья решений, k-ближайшие соседи (k-NN), множественная линейная регрессия и функция двух переменных. Кратко они описаны следующим образом.

Брайдотти и др. [40] в своем исследовании применяли методы машинного обучения (такие как деревья решений, k-NN и машина опорных векторов). По результатам их исследования наилучший выбор был представлен пакетными деревьями решений, которые показали очень хорошую точность для методов классификации и определения поврежденных отсеков. Для решения других задач они рекомендовали отдать предпочтение взвешенной k-NN, которая обеспечивала более высокую точность сценария прогнозирования.

Коджо и др. [41] использовали различные методы машинного обучения для выявления определенных признаков деградации исследуемого объекта. Применялись различные методы управляемого обучения. Сравнение классификаторов и методов показало, что подходы логистической регрессии и дерева решений являются надежными инструментами бинарной классификации с точностью 97,917% и 99,884% соответственно, в то время как метод k-NN не может обеспечить точного прогнозирования. Благодаря обработке результатов с помощью современных методов машинного обучения появляется возможность расширить область применения полученных результатов.

Чжан и др. [42] провели эксперимент по моделированию выбросов выхлопных газов с судов. Модель прогнозирования содержания серы позволила эффективно прогнозировать содержание серы в судовом мазуте. В статье рассматривается использование глубокой нейронной сети для повышения точности прогнозирования содержания серы в судовом остаточном топливе.

Анализ литературы показал, что существует глобальная проблема: примерно 15% выбросов NO_x и от 4 до 9% выбросов SO_2 обусловлены судоходством [43]. Около 70% выхлопных газов выбрасывается в морскую атмосферу на расстоянии менее 400 км от суши, вызывая серьезное загрязнение воздуха в прибрежных районах, особенно вокруг портов с большим грузопотоком [44-48]. Сера, содержащаяся в судовом мазуте, приводит к образованию большого количества SO_2 в результате химических реакций, происходящих во время работы двигателя, а количество выбрасываемого SO_2 напрямую зависит от содержания серы в судовом топливе [49]. Ужесточение требований к содержанию серы показало, что накопленных знаний недостаточно, и это направление исследований является крайне актуальным.

Исходя из современного состояния проблемы и возможных методов ее решения, можно сделать вывод, что использование инструментов машинного обучения для прогнозирования и моделирования состава судовых типов топлива является актуальным. Однако на сегодняшний день не существует конкретного метода, позволяющего точно определить характеристики несовместимости типов топлива. Кроме того, точность использования различных методов машинного обучения сильно зависит от исходных данных.

Отсутствие точных зависимостей о влиянии состава мазутов на образование отложений вследствие проявления несовместимости позволяет выявить пробел в исследованиях. Многие исследователи ограничиваются лишь общими рекомендациями, и эта проблема пока не решена в полной мере. Понимание и правильное использование методов машинного обучения позволит разработать эффективный инструмент и значительно повысить точность прогноза.

2. Материалы и методы

Для разработки практического надежного инструмента, который можно использовать для определения осадкообразования по результатам экспериментальных исследований влияния

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

н-парафинов и асфальтенов на совместимость остатков судового топлива, было рассмотрено несколько методов машинного обучения.

Первым рассмотренным методом является множественная линейная регрессия. Данная модель является одним из наиболее важных и широко используемых методов регрессии. Одним из ее преимуществ является простота интерпретации результатов.

Рассмотрена математическая модель на основе графов – дерево решений. Эта модель определяет процесс принятия решения таким образом, что в ней представлены все возможные решения, предшествующие и последующие события или другие решения, а также последствия каждого окончательного решения. Дерево решений – это известный непараметрический управляемый алгоритм, основанный на бинарных решениях. Деревья решений могут использоваться как для классификации, так и для регрессии (обеспечивая кусочно-модульную аппроксимацию функции ответа). Процесс принятия решения имеет форму дерева или графа, начинающегося с нулевой вершины и переходящего от одной вершины к другой в соответствии со значениями предикторов (листья – предсказанный ответ). Типичная структура дерева решений показана на рис. 1. Начиная с выбора маршрута, решения принимаются, исходя из двух возможных направлений, в соответствии со значением одного предиктора xj. Аналогичный процесс выполняется в каждом пройденном узле по структуре дерева до тех пор, пока не будет достигнут лист решений, соответствующий классу ответов.

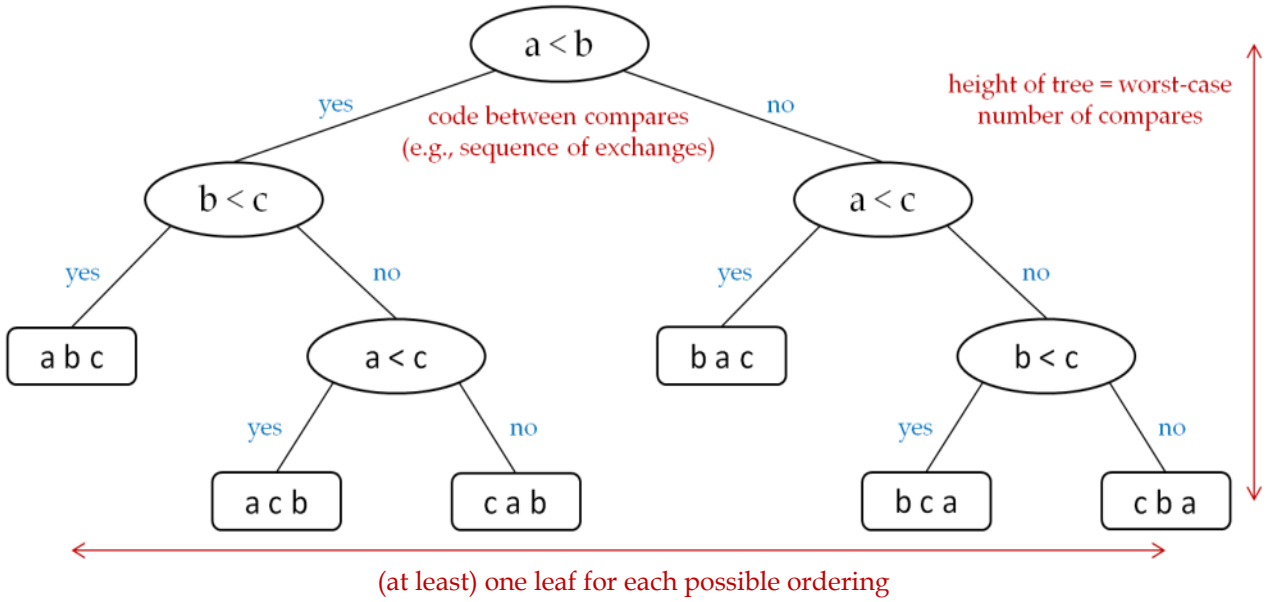


Рис. 1. Пример дерева решений

Деревья решений обучаются на наборе данных, который предоставляет взаимосвязи между предикторами и ответами, моделируя отношения между ними. В данной работе принят единый метод построения дерева решений с использованием индекса разнообразия Джини в качестве меры учета критериев разделения [50]. В каждом узле проверяются все предикторы для выбора того, который максимизирует выгоду от критерия разделения.

Для решения задачи классификации также используется метод k-NN. Он относит объекты к тому классу, к которому принадлежит большинство из k его ближайших соседей в многомерном пространстве признаков. Число k – это количество соседних объектов в пространстве признаков, которые сравниваются с классифицируемым объектом. Другими словами, если k = 4, то каждый объект сравнивается с четырьмя соседями. Метод широко используется в технологиях интеллектуального анализа данных (Data Mining).

Данный алгоритм можно разделить на два простых этапа: обучение и классификация. В процессе обучения алгоритм запоминает векторы признаков наблюдения и метки их классов (т.е. примеры). Также задается параметр алгоритма k, задающий количество «соседей», которые будут использоваться при классификации. На этапе классификации предъявляется новый объект, для которого еще не задана метка класса. Для него определяются k ближайших предварительно классифицированных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

наблюдений. Затем выбирается класс, к которому принадлежит большинство примеров k ближайших соседей, и к этому же классу относится классифицируемый объект [51] (рис. 2).

Круг на рис. 2 представляет собой объект, который необходимо отнести к одному из двух классов «треугольники» и «квадраты». Если мы выберем k = 3, то из трех ближайших объектов два окажутся «треугольниками» и один «квадратом».

Для реализации описанных выше методов используется язык программирования Python. Кроме того, для решения поставленной задачи используется математический метод нахождения функции двух переменных методом аппроксимации в программе Matlab.

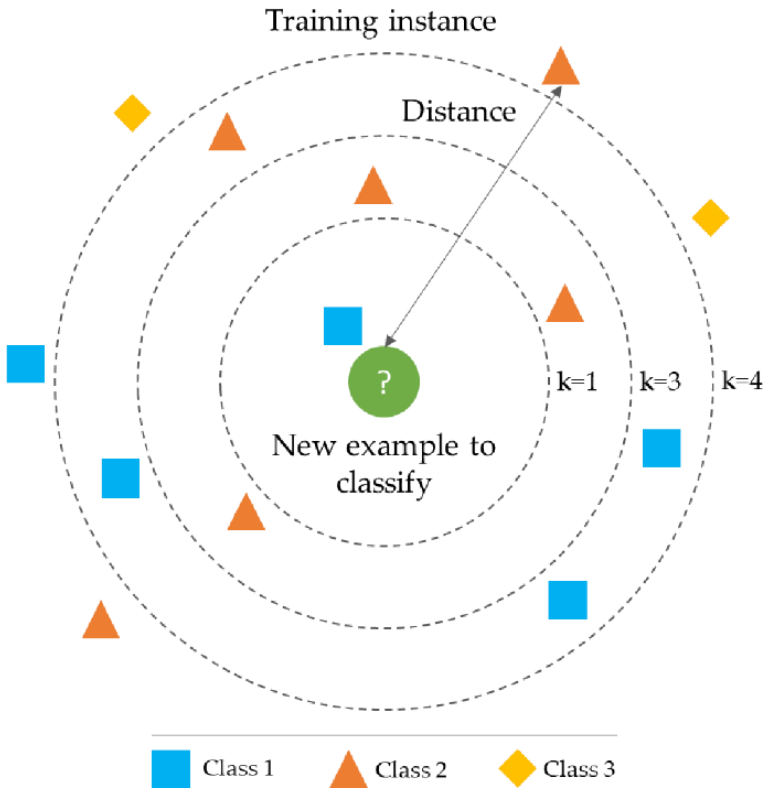


Рис. 2. Представление K-NN [51]

3. Результаты

В настоящем исследовании используются следующие марки остаточного судового топлива:

- Образец № 1 – комбинированные масла марки А тип 1 (КМК).
- Образец № 2 – топливо для судовых установок ТСУ-80 (РМД-80).
- Образец № 3 – топливо для судовых установок ТСУ-380 (РМГ-380).
- Образец № 4 – топливо нефтяное М-100, малозольное (РК-700).

Были определены основные физико-химические факторы типов топлива, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества остаточного судового топлива [38]

№	Наименование показателя	Единица измерения	Положение о методе испытаний	Результат			
				Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4
1	Плотность при 15 °C	кг/м^3	ISO 12185	833,5	901,0	956,0	976,0
2	Кинематическая вязкость при 50 °C	мм^2/с	GOST 33 ISO 3104	12,1	34,5	321,5	680,1
3	Температура вспышки PMCC	°C	GOST R EN ISO 2719	181,0	110,0	98,0	110,0

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

№	Наименование показателя	Единица измерения	Положение о методе испытаний	Результат			
				Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4
4	Массовая доля серы	%	GOST R 51947 ISO 8754	0,004	0,046	1,276	2,668
5	Точка застывания	°C	ASTM D 6749	26,0	10,0	16,0	20,0
6	Массовая доля воды	%	GOST R 51946 ISO 3733	–	–	0,05	0,1
7	Суммарный ускоренный осадок (СУО)	%	GOST R 50837.6 ISO 10307-2	0,01	0,01	0,02	0,03
8	Сумммарный потенциал осадка (СПО)	%	GOST R 50837.6 ISO 10307-2	0,01	0,01	0,02	0,04

С помощью SARA-анализа был определен групповой состав представленных типов топлива (табл. 2), после чего были приготовлены топливные смеси в соответствии с планом эксперимента [38, 44].

Таблица 2

Анализ углеводородного группового состава образцов топлива [38]

Образцы топлива	Асфальтены, масс. %	n-Алканы, масс. %	Изоалкан, масс. %	Нафтены, масс. %	Алкены, масс. %	Ароматические углеводороды, масс. %	Смолы, масс. %
No.1	–	71,93	18,35	2,62	5,55	1,55	–
No.2	–	38,68	55,09	4,95	–	1,28	–
No.3	2,53	54,14	22,74	5,43	0,57	14,12	0,47
No.4	7,15	51,15	20,71	4,37	0,41	15,70	0,51

Для определения совместимости и стабильности остатков разных типов судового топлива было проведено семь серий лабораторных испытаний по методике, предложенной авторами [52]. Определено влияние н-парафинов от 55 до 70 масс. % при содержании асфальтенов от 0,5 до 3,5 масс. % с шагом 0,5 % и получены зависимости, представленные на рис. 3.

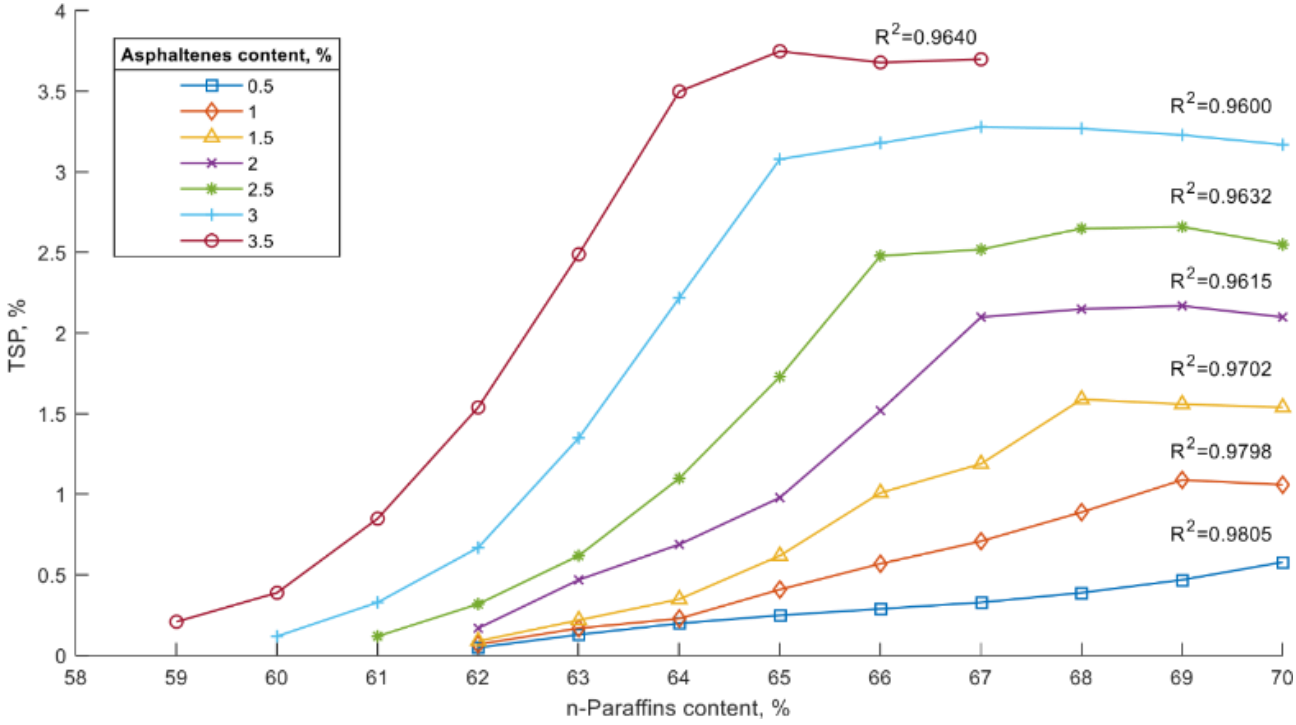


Рис. 3. Влияние н-парафинов и асфальтенов на общее содержание осадка

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Было приготовлено 112 различных топливных смесей требуемого состава и проведены лабораторные испытания для определения содержания СПО. На рис. 4 в качестве примера показаны фильтры для одной серии испытаний с содержанием асфальтенов 0,5 масс. % и н-парафинов от 56 до 70 масс. % [38, 52, 53]. Даже визуально можно определить несовместимость топливных композиций с содержанием н-парафинов от 63 до 70 масс. %, где в верхних фильтрах присутствует большое количество общего осадка. Трехмерная визуализация полученных экспериментальных результатов представлена на рис. 5.

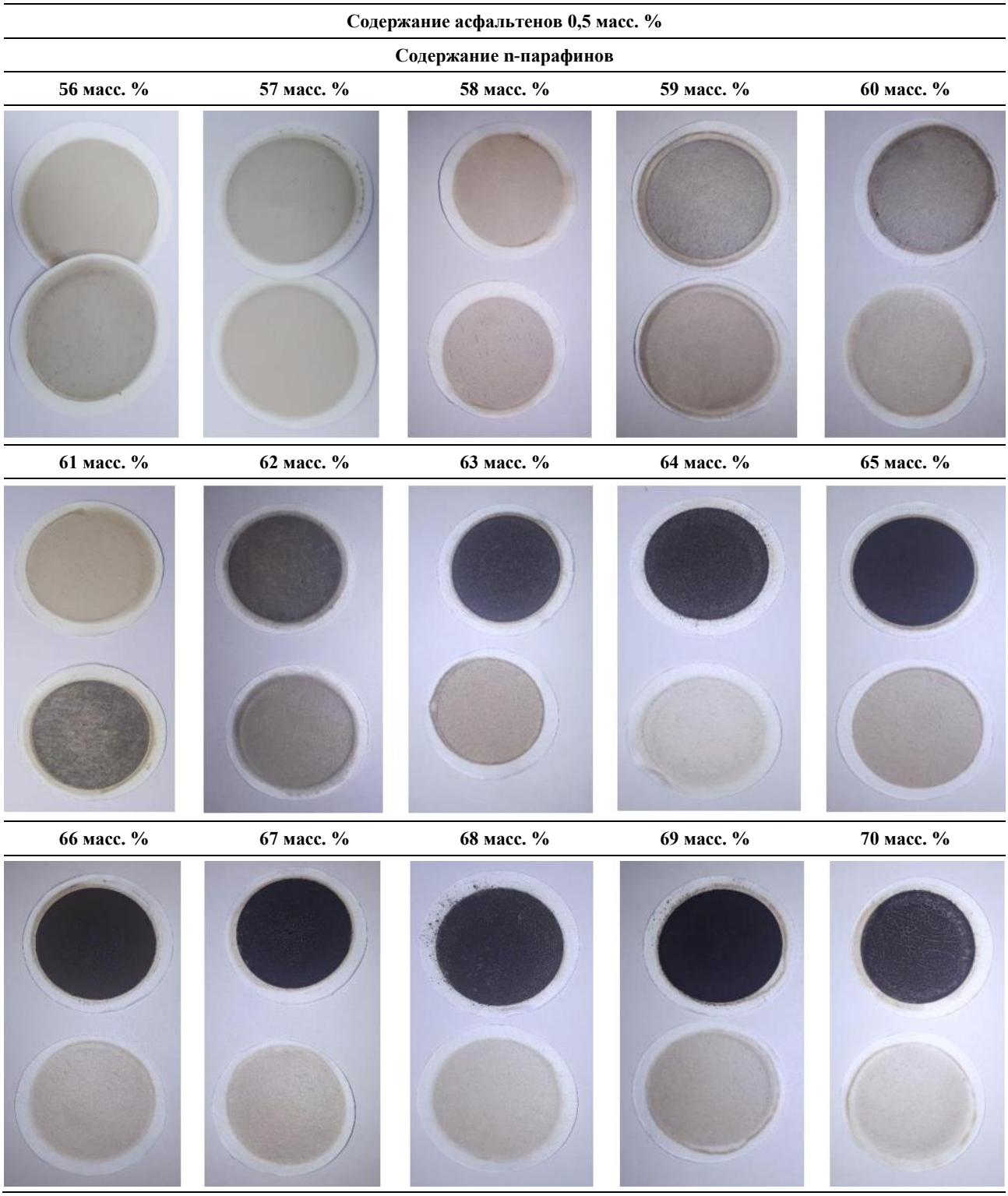


Рис. 4. Фильтры после определения СПО при содержании асфальтенов 0,5 масс. %

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В табл. 3 приведена численная интерпретация трехмерной модели в связи с влиянием асфальтенов и н-парафинов на формирование осадка.

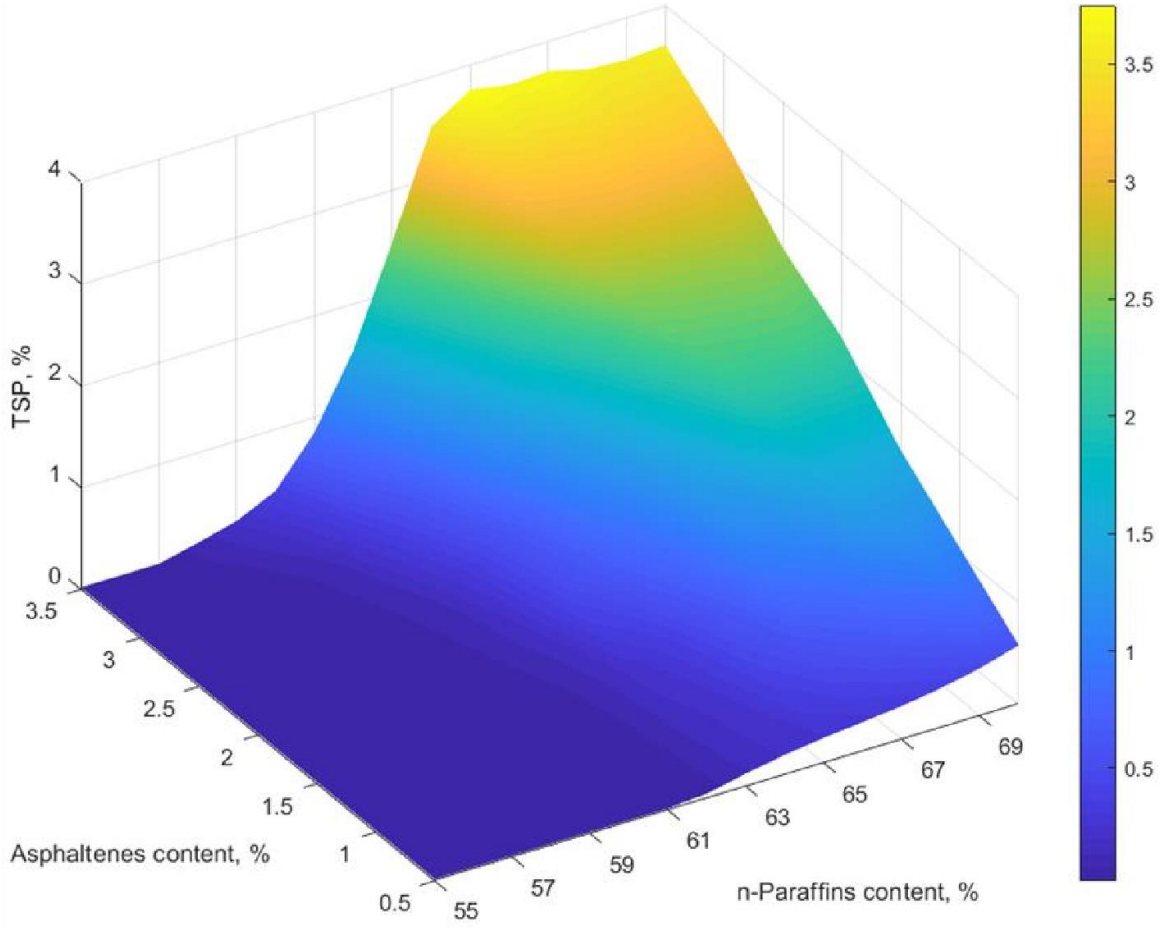


Рис. 5. Трехмерная визуализация полученной модели экспериментальных данных по влиянию н-парафинов и асфальтенов на проявление несовместимости

Таблица 3

Показатели влияния н-парафинов и асфальтенов на седиментацию [38]

n-парафины, %	**Асфальтены,%**						
	0,5	**1,0**	**1,5**	**2,0**	**2,5**	**3,0**	**3,5**
55	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
56	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
57	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
58	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,11
59	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,05	0,21
60	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,12	0,39
61	0,02	0,02	0,04	0,08	0,12	0,33	0,85
62	0,05	0,07	0,09	0,17	0,32	0,65	1,54
63	0,13	0,17	0,22	0,47	0,62	1,28	2,49
64	0,20	0,23	0,35	0,69	1,10	2,22	3,50
65	0,25	0,41	0,62	0,98	1,73	3,08	3,75
66	0,29	0,57	1,01	1,52	2,48	3,19	3,68
67	0,33	0,71	1,19	2,18	2,55	3,25	3,70
68	0,39	0,89	1,59	2,20	2,59	3,22	3,60
69	0,47	1,11	1,56	2,22	2,63	3,22	3,58
70	0,58	1,06	1,54	2,17	2,57	3,17	3,61

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На основании полученных экспериментальных данных можно определить зависимости влияния состава топливной смеси на седиментацию. Однако представленные данные описывают зависимости только от удельного содержания топливной композиции, что сложно применить на практике. Поэтому необходимо разработать практический надежный инструмент для определения седиментационной активности при различных значениях содержания н-парафинов и асфальтенов в рассматриваемых диапазонах.

Для обработки экспериментальных данных с целью разработки численного инструмента рассматриваются следующие методы:

- линейная регрессия,
- дерево решений,
- k-NN,
- нахождение функции двух переменных методом аппроксимации.

С помощью модели линейной регрессии находятся веса параметров x и y. На основе этого выводится формула линейной регрессии, которая позволяет объединить результаты всех экспериментов. Формула линейной регрессии для анализируемых параметров:

$$z = 0.66673469 \cdot x + 0.20424176 \cdot y \quad (1)$$

Коэффициент детерминации R^2 этой формулы составляет 0,772.

Используя модель машинного обучения «дерево решений», можно добиться и более высокого коэффициента детерминации $R^2 = 0{,}910$. На визуализации модели «дерево решений» видно, как ветви и листья разделены по параметрам и значениям. Данная модель может быть использована для прогнозирования других результатов в зависимости от параметров *x* и *y*.

Найдя аппроксимацией функцию двух переменных, по полученным данным была разработана программа расчета, которая позволит получить результат в удобном формате при определенных граничных условиях. Процедура псевдопрограммирования 1 приведена ниже.

Процедура 1. Аппроксимация двух переменных

Input: n, m, data

for i = 1 to n do

for j = 1 to m do

Polyfit() коэффициенты полинома пятого порядка

Linspace()

Polyval() вычисление ординат аппроксимирующего полинома

end for

For each k = I polynomialcoefficient коэффициенты полинома по xi

Endfor

Для того чтобы определить неизвестную функцию двух переменных Z = f(X,Y), необходимо по данным, представленным в виде таблицы, построить графики для известных значений Y. Затем построить наиболее точную линию тренда (полином 5-й степени со значением аппроксимации выше $R^2 = 0{,}990$). Полиномиальная линия тренда в 4-й степени дает меньшую точность аппроксимации, а в 6-й степени она идентична, как и в 5-й степени. Для получения более точной модели рассматривается диапазон данных по соответствующему содержанию н-парафина от 57 до 70 мас. %. Следующим шагом является определение коэффициентов полинома и составление уравнения Z = f(X) для каждой кривой. Далее приводится функция Z = f(X,Y) и определение коэффициентов полинома для функции двух переменных. Таким образом, введение любых значений н-парафинов (X) в диапазоне от 55 до 70 и асфальтенов (Y) в диапазоне от 0,5 до 3,5 позволяет определить значения СПО. Результаты расчетов представлены на рис. 6 и в табл. 4.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

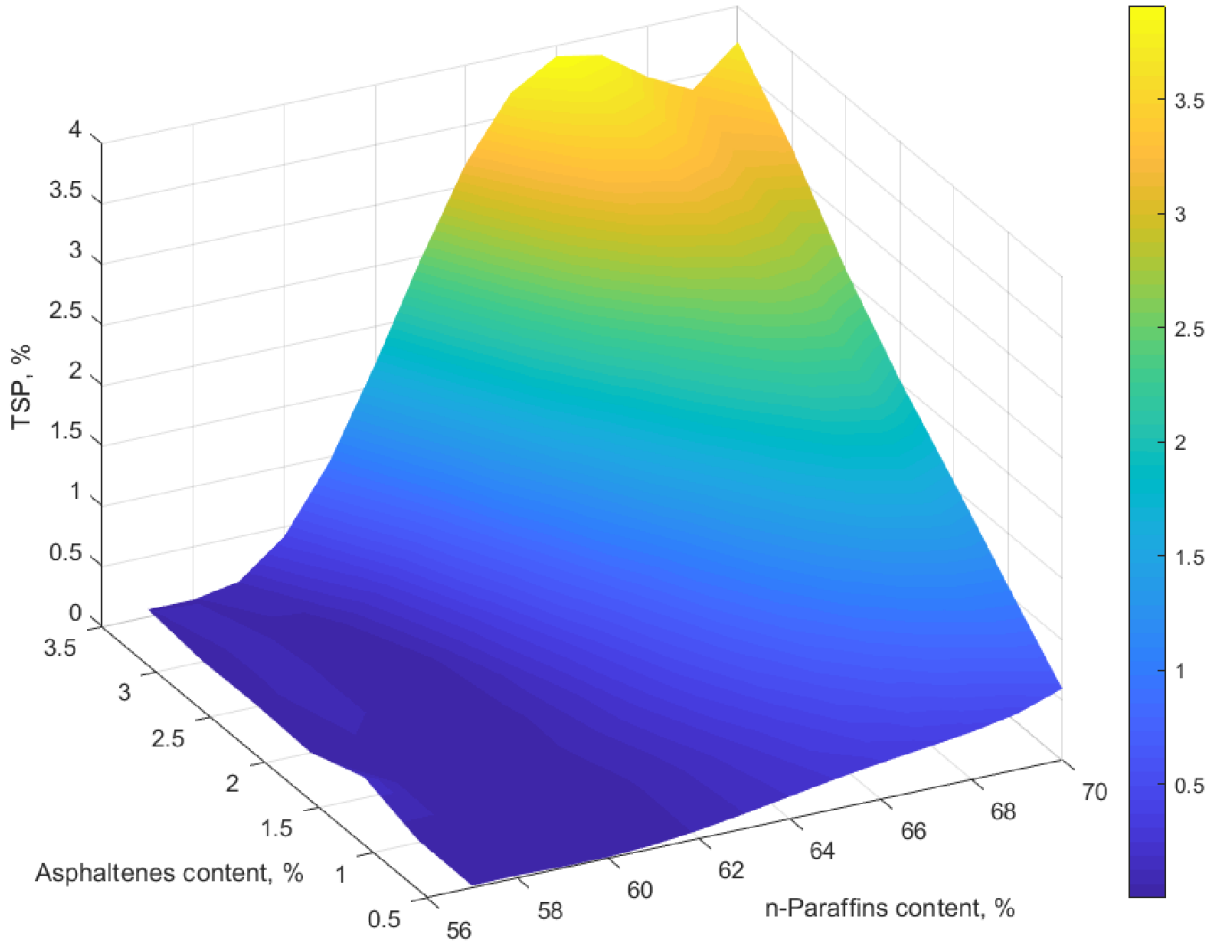


Рис. 6. Визуализация трехмерной модели на основе нахождения функции двух переменных методом аппроксимации

Таблица 4

Расчетные значения СПО, полученные при нахождении функции двух переменных методом аппроксимации

n-парафины, %	Асфальтены,%						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
55	0,020	0,022	0,170	0,003	0,022	0,012	0,061
56	0,024	0,019	0,025	0,064	0,107	0,112	0,059
57	0,013	0,015	0,021	0,041	0,040	0,024	0,128
58	0,012	0,016	0,021	0,014	0,013	0,031	0,418
59	0,030	0,031	0,043	0,039	0,066	0,277	0,956
60	0,070	0,069	0,108	0,155	0,320	0,776	1,679
61	0,124	0,136	0,229	0,373	0,732	1,455	2,467
62	0,186	0,239	0,417	0,689	1,246	2,184	3,181
63	0,247	0,378	0,669	1,076	1,783	2,821	3,689
64	0,299	0,550	0,966	1,491	2,256	3,243	3,909
65	0,344	0,730	1,274	1,873	2,592	3,387	3,836
66	0,391	0,904	1,535	2,149	2,743	3,287	3,576
67	0,460	1,032	1,664	2,230	2,710	3,110	3,386
68	0,587	1,063	1,548	2,016	2,557	3,194	3,701
69	0,020	0,022	0,170	0,003	0,022	0,012	0,061
70	0,024	0,019	0,025	0,064	0,107	0,112	0,059

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На основе метода k-NN разработана программа на языке Python для расчета показателя СПО в топливной смеси по результатам полученных экспериментальных данных. Процедура программы 2 представлена следующим образом.

Процедура 2. Метод k-NN

```
Input: import pandas as pd
from sklearn.neighbors import KNeighborsRegressor
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.metrics import r2_score
df = pd.read_csv('data.csv', sep = ';')
X = df[['x', 'y']]
z = df['z']
scaler = StandardScaler()Normalized by StandardScaler
X_sc = scaler.fit_transform(X)
model_knn = KNeighborsRegressor(n_neighbors = 4)
model_knn.fit(X_sc, z)
z_pred = model_knn.predict(X_sc)
r2_score(z, z_pred)
x_new, y_newinput new variables
new = scaler.transform([[x_new, y_new]])
model_knn.predict(new)
array([0.02])
df['z_pred'] = z_pred
df.to_csv('z_pred.csv', sep = ';', decimal = ',')
```

Для повышения точности расчета производится нормирование и берутся четыре соседа, т.е. k = 4. При увеличении коэффициента k точность расчетов будет снижаться из-за недостаточного набора данных. Суть метода заключается в классификации объектов, которые принадлежат большему числу ближайших соседей в многомерном пространстве признаков по сравнению с классифицируемым объектом. Данный метод используется в Data Mining технологиях. Математически этот метод основан на измерении минимального расстояния от центра группы до каждого наблюдения (2), для чего определяется длина вектора:

$$a_i = \sqrt{(a_x - b_x)^2 - (a_y - b_y)^2} \quad (2)$$

Путем вычисления длины каждого вектора, при вводе значений *x* и *y*, значение *z* определяется интерполяцией, на основе известных данных от «соседей». Данная модель имеет высокую доверительную вероятность аппроксимации R2 = 0,985.

Для наглядного сравнения с экспериментальными данными на рис. 7 показана трехмерная модель, а в табл. 5 приведены результаты расчетов, которые выполняются в разработанной программе.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 5

Расчетные значения СПО по модели k-NN

n-парафины, %	Асфальтены,%						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
55	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
56	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,042
57	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,042
58	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,027	0,090
59	0,020	0,020	0,025	0,042	0,055	0,130	0,390
60	0,027	0,032	0,042	0,080	0,130	0,292	0,747
61	0,027	0,032	0,042	0,080	0,130	0,292	0,747
62	0,055	0,070	0,092	0,190	0,280	0,617	1,317
63	0,157	0,220	0,320	0,577	0,942	1,830	2,820
64	0,217	0,345	0,550	0,915	1,482	2,457	3,355
65	0,217	0,345	0,550	0,915	1,482	2,457	3,355
66	0,267	0,480	0,792	1,322	1,957	2,940	3,655
67	0,370	0,815	1,337	1,985	2,577	3,240	3,640
68	0,442	0,937	1,470	2,130	2,595	3,237	3,622
69	0,442	0,937	1,470	2,130	2,595	3,237	3,622
70	0,625	0,905	1,697	2,242	2,757	3,320	3,490

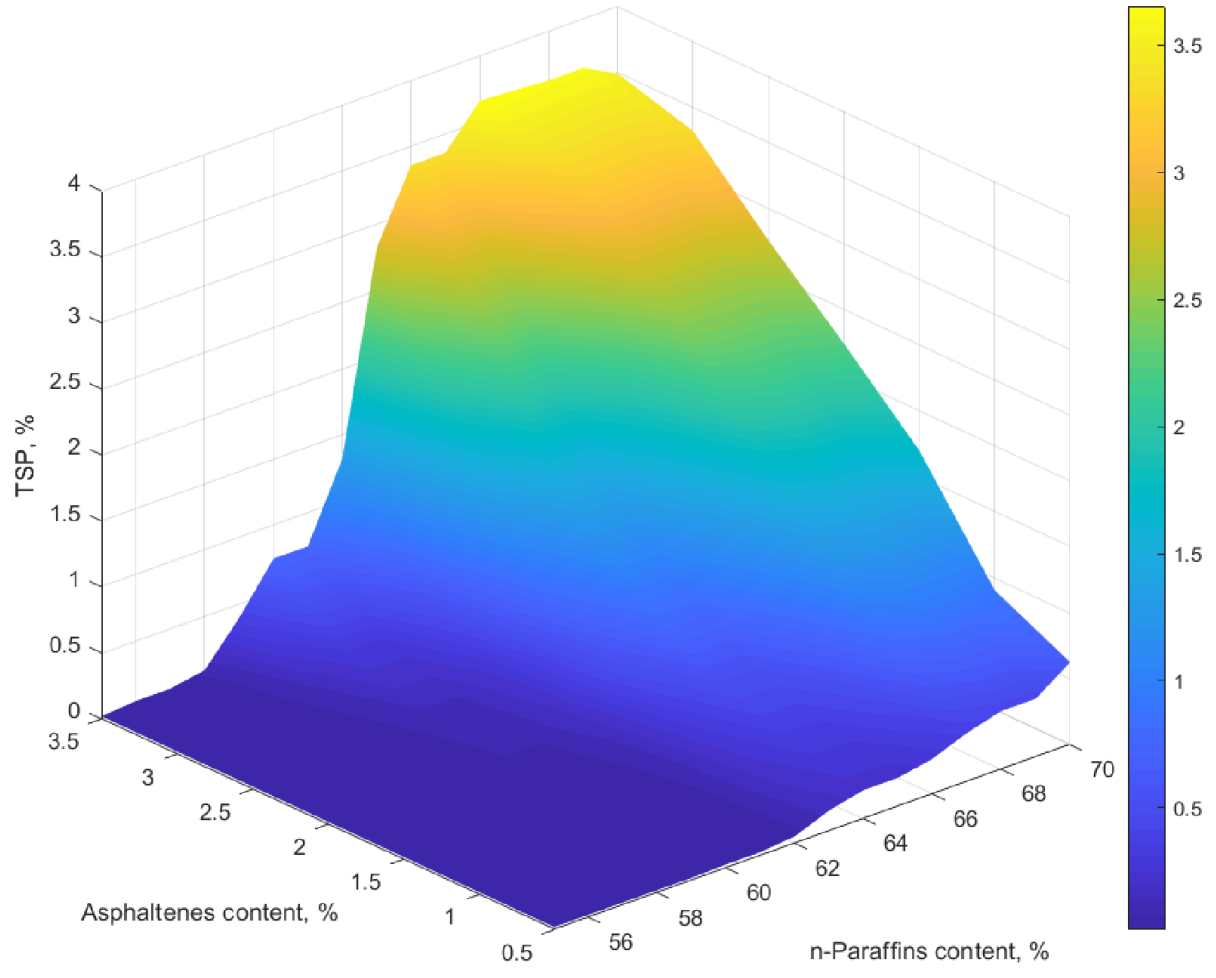


Рис. 7. Трехмерная визуализация на основе k-NN

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. Обсуждение

В данной статье рассмотрены четыре метода обработки экспериментальных данных и получения надежного инструмента, применимого на практике: линейная регрессия, дерево решений, k-NN и нахождение функции двух переменных в качестве аппроксимации. Линейная регрессия показала малодостоверный результат (R^2 = 0,772), а метод дерева решений (R^2 = 0,910) недостаточно надежен. Предположительно, для построения более точной модели на основе этого метода требуется большая выборка данных.

Относительно точные прогнозы получены на основе методов нахождения функции двух переменных методом аппроксимации (R^2 = 0,90) и k-NN (R^2 = 0,985). Можно отметить, что выполненные расчеты значений ОСП методом k-NN имеют наибольшую погрешность на границе максимальных значений, так как соседи представлены только группами с противоположных сторон относительно границы данных в области максимальных значений.

Напротив, при расчетах по функции двух переменных наибольшая ошибка наблюдается при низкой концентрации н-парафинов и одновременно при наибольших значениях асфальтенов. Линия тренда представлена полиномиальной функцией 5-й степени. Следовательно, начало зависимости имеет волнообразную форму. Амплитуда полиномиальной функции увеличивается с ростом значений СПО, поэтому график функции может пересекать ось x. Для того чтобы избежать появления отрицательных значений, полученные данные берутся по модулю.

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности практического расчета проявления несовместимости при смешении остатков судового топлива разных типов. Благодаря полученным зависимостям влияния н-парафинов и асфальтенов на проявление несовместимости можно заранее снизить риски при построении логистической цепочки поставок разных типов топлива на судовые топливные терминалы и в резервуарные парки. Приведенные результаты могут быть использованы для создания численной модели прогнозирование содержания осадка в композиционных типах судового топлива с требуемым содержанием серы.

Изменение симметричного положения трехмерной поверхности, представленной на рис. 4-6, свидетельствует об изменении зависимости между содержанием асфальтенов и н-парафинов, а также соответствующего осадкообразования. Таким образом, асимметрия трехмерных диаграмм – это степень несовместимости остаточных морских типов топлива, показывающая влияние представленных факторов на осадкообразование [54-59].

5. Выводы

В данной работе проведены эксперименты по определению физико-химических характеристик типов топлива. Проведены измерения влияния н-парафинов и асфальтенов на общее содержание осадка. Путем анализа результатов экспериментов получены основные корреляции между составом топливной смеси и седиментацией. При обработке данных используются различные методы машинного обучения. Таким образом, разработан надежный инструмент для определения возможности возникновения несовместимости при смешивании остатков различных типов судового топлива.

Отсутствие в международном стандарте ISO 8217 требований к содержанию асфальтенов в судовом остаточном топливе сохраняет риски несовместимости. В связи с этим активное образование отложений может стать причиной не только экологических, но и технических проблем. При работе судовых двигателей высокое содержание отложений может привести к выходу из строя всей топливной системы и засорению фильтров, что является существенной угрозой для нормальной работы и безопасности персонала, особенно если поломка происходит во время плавания вдали от причалов и портов и/или в плохих погодных условиях. Предлагается регламентировать данный параметр. Это позволит судовладельцам и покупателям заранее оценить риски несовместимости и тем самым сохранить качество топлива.

В дальнейших исследованиях возможно проведение экспериментов по определению содержания серы в выхлопных газах, а также в самом осадке, в зависимости от рассчитанных параметров несовместимости, для создания модели прогнозирования концентрации SO_2 в выхлопных газах судов. Кроме того, глубокая нейронная сеть будет усовершенствована с целью повышения точности прогнозов и расчетов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

6. Патенты

Способ определения совместимости и стабильности компонентов топливной смеси. Доступно в Интернете: https://new.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/733/748/%D0%98%D0%97-02733748-00001/document.pdf (дата обращения: 23.09.2021).

Программа для расчета кинематической вязкости, плотности, содержания серы и воды в смеси нефти и нефтепродуктов. Доступно в Интернете: https://new.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/020/613/357/2020613357-00001/document.pdf (дата обращения: 23.09.2021).

***Вклад авторов**: Концептуализация, Р.С., И.Б. и С.И.; методология, И.Б.; программное обеспечение, Р.С. и И.Б.; валидация, С.И.; формальный анализ, И.Б.; исследование, Р.С., И.Б., С.И. и М.К.О.; ресурсы, Р.С. и И.Б.; курирование данных, Р.С. и И.Б.; написание – подготовка первоначального проекта, Р.С., И.Б. и С.И.; написание – первоначальная подготовка проекта, Р.С., И.Б., С.И. и М.К.О.; написание – рецензирование и редактирование, Р.С., И.Б., С.И. и М.К.О.; визуализация, С.И. и М.К.О.; руководство, Р.С.; управление проектом, Р.С. Все авторы прочитали и согласились с опубликованным вариантом рукописи.*

***Финансирование**: Исследование выполнено за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год: ФСРВ-2020-0014.*

***Заявление Совета по институциональному надзору**: Не применимо.*

***Заявление об информированном согласии**: Не применимо.*

***Заявление о доступности данных**: Не применимо.*

***Благодарности**: Авторы благодарят Санкт-Петербургский горный университет за предоставленную возможность проведения лабораторных экспериментов. Исследования проводились с использованием оборудования Научного центра «Проблемы переработки минеральных и техногенных ресурсов» и Учебно-научного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.*

***Конфликты интересов**: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Сокращения

GOST	Российский государственный стандарт
ISO	Международная организация по стандартизации
MMO	Международная морская организация
k-NN	k-ближайшие соседи
SARA	Насыщенные, ароматические, смолистые и асфальтеновые вещества
СУО	Суммарный ускоренный осадок
СПО	Суммарный потенциал осадка

ЛИТЕРАТУРА

1. 2050 Long-Term Strategy. Available online: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-termstrategy_en (accessed on 11 October 2021).
2. Concepts for the Development of Hydrogen Energy in the Russian Federation. Available online: http://government.ru/docs/42971/ (accessed on 11 October 2021).
3. On Approval of a Comprehensive Plan to Improve the Energy Efficiency of the Russian Economy. Available online: http://static.government.ru/media/files/rE6AtHAmGYeZUz51fpCeHYfmuyRzUGow.pdf (accessed on 11 October 2021).
4. On Introducing a Draft Law on the Use of Subsoil Waste. Available online: http://static.government.ru/media/files/el8BjIdNpygksaGP3td60eqnQ1XvPfwz.pdf (accessed on 11 October 2021).
5. Morenov, V.; Leusheva, E.; Buslaev, G.; Gudmestad, O.T. System of comprehensive energy-efficient utilization of associated petroleum gas with reduced carbon footprint in the field conditions. *Energies* 2020, 13, 4921. http://doi.org/10.3390/en13184921
6. Bykova, M.V.; Alekseenko, A.V.; Pashkevich, M.A.; Drebenstedt, C. Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarboncontaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes. *Environ. Geochem. Health* 2021, 43, 2331–2346. http://doi.org/10.1007/s10653-020-00802-0
7. Litvinenko, V. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: The focus on liquefied natural gas. *Resources* 2020, 9, 59. http://doi.org/10.3390/resources9050059
8. Litvinenko, V.; Meyer, B. *Syngas Production: Status and Potential for Implementation in Russian Industry*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017; pp. 1–161. http://doi.org/10.1007/978-3-319-70963-5
9. Zhukovskiy, Y.; Tsvetkov, P.; Buldysko, A.; Malkova, Y.; Stoianova, A.; Koshenkova, A. Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic. *Resources* 2021, 10, 124. http://doi.org/10.3390/resources10120124
10. Korshunov, G.I.; Eremeeva, A.M.; Drebenstedt, C. Justification of the use of a vegetal additive to diesel fuel as a method of protecting underground personnel of coal mines from the impact of harmful emissions of diesel-hydraulic locomotives. *J. Min. Inst.* 2021, 247, 39–47. http://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.5
11. Statistical Review of World Energy 2021 (70th edition). Available online: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-oil.pdf (accessed on 11 October 2021).
12. Annual Report 2020. Available online: https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/AR%202020.pdf (accessed on 11 October 2021).

 Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

13. Analysis and Forecast to 2026 (Oil 2021). Available online: https://iea.blob.core.windows.net/assets/1fa45234-bac5-4d89-a532-768960f99d07/Oil_2021-PDF.pdf (accessed on 11 October 2021).

14. Schieldrop, B. *IMO 2020 Report: Macro & FICC Research*; Skandinaviska Enskilda Banken AB Publication: Stockholm, Sweden, 2018.

15. Fetisov, V.; Mohammadi, A.H.; Pshenin, V.; Kupavykh, K.; Artyukh, D. Improving the economic efficiency of vapor recovery units at hydrocarbon loading terminals. *Oil Gas Sci. Technol. Rev. IFP Energ. Nouv.* 2021, 76, 38. http://doi.org/10.2516/ogst/2021022

16. Fetisov, V.; Pshenin, V.; Nagornov, D.; Lykov, Y.; Mohammadi, A.H. Evaluation of pollutant emissions into the atmosphere during the loading of hydrocarbons in marine oil tankers in the Arctic region. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020, 8, 917. http://doi.org/10.3390/jmse8110917

17. IMO. *Reduction of GHG Emissions from Ships—Third IMO GHG Study 2014—Final Report*; International Maritime Organization: London, UK, 2015.

18. IMO. *Annex VI Prevention of Air Pollution from Ships of International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*; International Maritime Organization: London, UK, 2005.

19. Kunshin, A.A.; Dvoynikov, M.V.; Blinov, P.A. Topology and dynamic characteristics advancements of liner casing attachments for horizontal wells completion. In *Proceedings of the VI Youth Forum of the World Petroleum Council–Future Leaders Forum*; St. Petersburg, Russia, 23–28 June 2019, Taylor & Francis: London, UK, 2019; pp. 376–381.

20. Li, C.; Yuan, Z.; Ou, J.; Fan, X.; Ye, S.; Xiao, T.; Shi, Y.; Huang, Z.; Ng, S.K.; Zhong, Z.; et al. An AIS-based high-resolution ship emission inventory and its uncertainty in Pearl River Delta region, China. *Sci. Total Environ*. 2016, 573, 1–10. http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.219

21. Liu, T.K.; Chen, Y.S.; Chen, Y.T. Utilization of vessel automatic identification system (AIS) to estimate the emission of air pollutant from merchant vessels in the port of Kaohsiung. *Aerosol Air Qual. Res.* 2019, 19, 2341–2351. http://doi.org/10.4209/aaqr.2019.07.0355

22. Miola, A.; Ciuffo, B.; Giovine, E.; Marra, M. *Regulating Air Emissions from Ships: The State of the Art on Methodologies, Technologies and Policy Options*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2010.

23. Lindstad, H.E.; Rehn, C.F.; Eskeland, G.S. Sulphur abatement globally in maritime shipping. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2017, 57, 303–313. http://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.028

24. Kondrasheva, N.K.; Rudko, V.A.; Nazarenko, M.Y.; Gabdulkhakov, R.R. Influence of parameters of delayed asphalt coking process on yield and quality of liquid and solid-phase products. *J. Min. Inst.* 2020, 241, 97–104. http://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.97

25. Gulvaeva, L.A.; Khavkin, V.A.; Shmelkova, O.I.; Mitusova, T.N.; Ershov, M.A.; Lobashova, M.M.; Nikulshin, P.A. Production technology for low-sulfur high-viscosity marine fuels. *Chem. Technol. Fuels Oils* 2019, 54, 759–765. http://doi.org/10.1007/s10553-019-00984-z

26. Dvoynikov, M.; Buslaev, G.; Kunshin, A.; Sidorov, D.A.; Kraslawski, A.; Budovskaya, M. New concepts of hydrogen production and storage in Arctic region. *Resources* 2021, 10, 3. http://doi.org/10.3390/resources10010003

27. Nguyen, V.T.; Rogachev, M.K.; Aleksandrov, A.N. A new approach to improving efficiency of gas-lift wells in the conditions of the formation of organic wax deposits in the Dragon field. *J. Petrol. Explor. Prod. Technol.* 2020, 10, 3663–3672. http://doi.org/10.1007/s13202-020-00976-4

28. Bai, J.; Jin, X.;Wu, J.T. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines. *Pet. Sci.* 2019, 16, 619–631. http://doi.org/10.1007/s12182-019-0309-7

29. Coutinho, J.A.P.; Edmonds, B.; Moorwood, T.; Szczepanski, R.; Zhang, X. Reliable wax predictions for flow assurance. *Energy Fuels* 2006, 20, 1081–1088. http://doi.org/10.1021/ef050082i

30. Kelbaliev, G.I.; Rasulov, S.R.; Ilyushin, P.Y.; Mustafaeva, G.R. Crystallization of paraffin from the oil in a pipe and deposition of asphaltene–paraffin substances on the pipe walls. *J. Eng. Phys. Thermophy*. 2018, 91, 1227–1232. http://doi.org/10.1007/s10891-018-1852-6

31. Rogachev, M.K.; Nguyen, V.T.; Aleksandrov, A.N. Technology for preventing the wax deposit formation in gas-lift wells at offshore oil and gas fields in Vietnam. *Energies* 2021, 14, 5016. http://doi.org/10.3390/en14165016

32. Wiehe, I.A.; Yarranton, H.W.; Akbarzadeh, Ê.; Rahimi, P.M.; Teclemariam, A. The paradox of asphaltene precipitation with normal paraffins. *Energy Fuels* 2005, 19, 1261–1267. http://doi.org/10.1021/ef0496956

33. Prakoso, A.; Punase, A.; Klock, K.; Rogel, E.; Ovalles, C.; Hascakir, B. Determination of the stability of asphaltenes through physicochemical characterization of asphaltenes. In Proceedings of the SPE Western Regional Meeting, Anchorage, AK, USA, 23 May 2016; pp. 1–20.

34. Wiehe, I.A.; Kennedy, R.J. The oil compatibility model and crude oil incompatibility. *Energy Fuels* 2000, 14, 56–59. http://doi.org/10.1021/ef990133+

35. Mitusova, T.N.; Kondrasheva, N.K.; Lobashova, M.M.; Ershov, M.A.; Rudko, V.A. Influence of dispersing additives and blend composition on stability of marine high-viscosity fuels. *J. Min. Inst*. 2017, 228, 722–725.

36. Stratiev, D.; Dinkov, R.; Shishkova, I.; Yordanov, D. Can we manage the process of asphaltene precipitation during the production of IMO 2020 fuel oil? *Erdoel Erdgas Kohle/EKEP* 2020, 12, 32–39.

37. Stratiev, D.; Russell, C.; Sharpe, R.; Shishkova, I.; Dinkov, R.; Marinov, I.; Petkova, N.; Mitkova, M.; Botev, T.; Obryvalina, A.; et al. Investigation on sediment formation in residue thermal conversion based processes. *Fuel Process. Technol*. 2014, 128, 509–518. http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.013

38. Sultanbekov, R.; Islamov, S.; Mardashov, D.; Beloglazov, I.; Hemmingsen, T. Research of the influence of marine residual fuel composition on sedimentation due to incompatibility. *J. Mar. Sci. Eng*. 2021, 9, 1067. http://doi.org/10.3390/jmse9101067

39. Boikov, A.; Payor, V.; Savelev, R.; Kolesnikov, A. Synthetic data generation for steel defect detection and classification using deep learning. *Symmetry* 2021, 13, 1176. http://doi.org/10.3390/sym13071176

40. Braidotti, L.; Valčić, M.; Prpić-Oršić, J. Exploring a flooding-sensors-agnostic prediction of the damage consequences based on machine learning. *J. Mar. Sci. Eng*. 2021, 9, 271. http://doi.org/10.3390/jmse9030271

41. Codjo, E.L.; Zad, B.B.; Toubeau, J.-F.; François, B.; Vallée, F. Machine learning-based classification of electrical low voltage cable degradation. *Energies* 2021, 14, 2852. http://doi.org/10.3390/en14102852

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

42. Zhang, Z.; Zheng, W.; Li, Y.; Cao, K.; Xie, M.; Wu, P. Monitoring sulfur content in marine fuel oil using ultraviolet imaging technology. *Atmosphere* 2021, 12, 1182. http://doi.org/10.3390/atmos12091182

43. Eyring, V.; Isaksen, I.S.A.; Berntsen, T.; Collins, W.J.; Corbett, J.J.; Endresen, O.; Grainger, R.G.; Moldanova, J.; Schlager, H.; Stevenson, D.S. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmos. Environ*. 2010, 44, 4735–4771. http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.059

44. Zhao, J.; Fan, J.; Zhang, B.; Shi, Y. Satellite remote-sensing monitoring technology and the research advances of SO_2 in the atmosphere. *J. Saf. Environ*. 2012, 4, 166–169.

45. Yan, H.; Chen, L.; Tao, J.; Han, D.; Su, L.; Yu, C. SO_2 long-term monitoring by satellite in the Pearl River Delta. *J. Remote Sens*. 2012, 2, 390–404.

46. Huaxiang, S.; Minhua, Y. Effectiveness evaluation of SO_2 emission reduction in Guizhou Province. *Earth Environ*. 2014, 5, 319–327.

47. Huaxiang, S.; Minhua, Y. Analysis on effectiveness of SO_2 emission reduction in Guangxi Zhuang Autonomous Region by satellite remote sensing. *Chin. J. Environ. Eng*. 2015, 3, 1361–1368.

48. Li, B.; Ju, T.; Zhang, B.; Ge, J.; Zhang, J.; Tang, H. Satellite remote sensing monitoring and analysis of the causes of temporal and spatial variation characteristics of atmospheric SO_2 Concentration in Tianshui. *Environ. Monit. China* 2016, 2, 134–140.

49. Li, C. Emissions Characteristics and Future Trends of Non-Road Mobile Sources in China. Master Thesis, South China University, Guangdong, China, 2017.

50. Breiman, L.; Friedman, J.; Olshen, R.A.; Stone, C.J. *Classification and Regression Trees*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1984.

51. Noteworthy the Journal Blog. A Quick Introduction to K-Nearest Neighbors Algorithm. Available online: https://blog.usejournal.com/a-quick-introduction-to-k-nearest-neighbors-algorithm-62214cea29c7 (accessed on 11 October 2021).

52. Nutskova, M.V.; Dvoynikov, M.V.; Budovskaya, M.E.; Sidorov, D.A.; Pantyukhin, A.A. Improving energy efficiency in well construction through the use of hydrocarbon-based muds and muds with improved lubricating properties. *J. Phys. Conf. Ser*. 2021, 1728, 012031. http://doi.org/10.1088/1742-6596/1728/1/012031

53. Method of Determining Compatibility and Stability of Fuel Mixture Components. Available online: https://new.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/733/748/%D0%98%D0%97-02733748-00001/document.pdf (accessed on 11 October 2021).

54. Program for Calculating Kinematic Viscosity, Density, Sulfur and Water Content for a Mixture of Crude Oil and Petroleum Products. Available online: https://new.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/020/613/357/2020613357-00001/document.pdf (accessed on 11 October 2021).

55. Savchenkov, S.; Kosov, Y.; Bazhin, V.; Krylov, K.; Kawalla, R. Microstructural Master Alloys Features of Aluminum–Erbium System. *Crystals* 2021, 11, 1353. http://doi.org/10.3390/cryst11111353

56. Leusheva, E.L.; Morenov, V.A. Development of combined heat and power system with binary cycle for oil and gas enterprises power supply. *Neft. Khozyaystvo-Oil Ind*. 104–106. http://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-7-104-106

57. Filatova, I.; Nikolaichuk, L.; Zakaev, D.; Ilin, I. Public-private partnership as a tool of sustainable development in the oil-refining sector: Russian case. *Sustainability* 2021, 13, 5153. http://doi.org/10.3390/su13095153

58. Bazhin, V.Y.; Savchenkov, S.A.; Kosov, Y.I. Specificity of the titanium-powder alloying tablets usage in aluminium alloys. *Non-Ferrous Met*. 2016, 2, 52–56. http://doi.org/10.17580/nfm.2016.12.11

59. Sharikov, Y.V.; Sharikov, F.Y.; Krylov, K.A. Mathematical Model of Optimum Control for Petroleum Coke Production in a Rotary Tube Kiln. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021, 55, 711–719. http://doi.org/10.1134/S0040579521030192

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0