

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТЕМНЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Б.В. Пешнев, Е.В. Бурляева, Д.В. Никишин, А.И. Николаев, А.С. Кузнецов

Борис Владимирович Пешнев (ORCID 0000-0002-0507-2754), Александр Игоревич Николаев (ORCID 0000-0001-8594-2985), Денис Васильевич Никишин (ORCID 0000-0002-4466-4402)*

Кафедра технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет, пр-т Вернадского, 86, Москва, Российская Федерация, 119571.

E-mail: peshnev@mirea.ru, nikolaev_a@mirea.ru, nikishin@mirea.ru*

Елена Валерьевна Бурляева (ORCID 0000-0003-1371-1410)

Кафедра информационных систем в химической технологии, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет, пр-т Вернадского, 86, Москва, Российская Федерация, 119571

E-mail: burlyaeva@mirea.ru

Андрей Сергеевич Кузнецов (ORCID 0000-0003-1569-4765)

Кафедра информационных технологий, искусственного интеллекта и общественно-социальных технологий цифрового общества, Российский государственный социальный университет, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 129226

E-mail: KuznetsovAS@rgsu.net

В работе представлены экспериментальные результаты влияния условий кавитационной обработки темных нефтепродуктов в гидродинамическом режиме на выход фракций, выкипающих до 400 °С. В качестве сырья рассматривались прямогонные продукты (мазуты, вакуумные газойли), а также газойли каталитического крекинга. Рассмотрено влияние характеристик сырья (плотности, фракционного и группового углеводородного состава) и условий его обработки (давления, при пяти циклах воздействия) на выход целевой фракции. Выявлена линейная зависимость выхода целевых фракций от давления обработки. Построенные регрессионные модели адекватны, информативны, все их коэффициенты значимы. Учет плотности исходного сырья не приводил к улучшению моделей. Наилучшая из построенных моделей была проверена методом скользящего контроля. Средняя погрешность прогнозирования составила 11%, максимальная – 22%. Для небольшого количества образцов такая погрешность является приемлемой. Возрастание выхода фракций, выкипающих до 400 °С, связано с превращениями углеводородов в процессе кавитации. Установлена возможность оценки эффективности кавитационной обработки нефтяного сырья по данным о его групповом углеводородном составе. Построено несколько регрессионных моделей, связывающих возрастание выхода с давлением в процессе обработки и содержанием в сырье смол и масел. Все они адекватны и информативны, а их коэффициенты значимы. На основании построенных моделей предположено, что изменение фракционного состава нефтепродуктов при кавитационной обработке в большей степени связано с разрушением переходного и сольватного слоев сложных структурных единиц нефтяной дисперсной системы, чем с протеканием реакций крекинга.

Ключевые слова: нефть и нефтепродукты, кавитация, фракционный состав, групповой состав, регрессионные модели, оценка эффективности воздействия

Для цитирования:

Пешнев Б.В., Бурляева Е.В., Никишин Д.В., Николаев А.И., Кузнецов А.С. Оценка эффективности кавитационной обработки темных нефтепродуктов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 7. С. 103–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20246707.7006.

For citation:

Peshnev B.V., Burlyayeva E.V., Nikishin D.V., Nikolaev A.I., Kuznetsov A.S. Assessment of the effectiveness of cavitation processing of dark oil products. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 7. P. 103–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20246707.7006.

**ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF CAVITATION PROCESSING
OF DARK OIL PRODUCTS**

B.V. Peshnev, E.V. Burlyayeva, D.V. Nikishin, A.I. Nikolaev, A.S. Kuznetsov

Boris V. Peshnev (ORCID 0000-0002-0507-2754), Alexander I. Nikolaev (ORCID 0000-0001-8594-2985), Denis V. Nikishin (ORCID 0000-0002-4466-4402)*

Department of Technology of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel named after. A.N. Bashkirov, Institute of Fine Chemical Technologies named after. M.V. Lomonosov, MIREA - Russian Technological University, Vernadskogo ave., 86, Moscow, 119571, Russia

E-mail: peshnev@mirea.ru, nikolaev_a@mirea.ru, nikishin@mirea.ru*

Elena V. Burlyayeva (ORCID 0000-0003-1371-1410)

Department of Information Systems in Chemical Technology, Institute of Fine Chemical Technologies named after. M.V. Lomonosov, MIREA - Russian Technological University, Vernadskogo ave., 86, Moscow, 119571, Russia

E-mail: burlyayeva@mirea.ru

Andrey S. Kuznetsov (ORCID 0000-0003-1569-4765)

Department of Information Technologies, Artificial Intelligence and Social Technologies of Digital Society, Russian State Social University, Wilhelm Pieck st., 4, bld. 1, Moscow, 129226, Russia

E-mail: KuznetsovAS@rgsu.net

The paper presents experimental results of the influence of the conditions of cavitation treatment of dark petroleum products in the hydrodynamic regime on the yield of fractions boiling up to 400 °C. Straight-run products (fuel oils, vacuum gas oils), as well as catalytic cracking gas oils, were considered as raw materials. The influence of raw material characteristics (density, fractional and group hydrocarbon composition) and its processing conditions (pressure, at five cycles of exposure) on the yield of the target fraction is considered. The linear dependence of the yield of the target fractions on the processing pressure is revealed. The constructed regression models are adequate, informative, and all their coefficients are significant. Taking into account the density of the feedstock did not improved models. The best model constructed was tested using the cross-validation method. The average forecast error was 11%, the maximum was 22%. For a small number of samples, such an error is acceptable. The possibility of assessing the effectiveness of cavitation treatment of crude oil based on data on its fractional and group hydrocarbon composition is shown. It was possible to build several regression models linking the increase in yield with pressure during processing and the content of resins and oils in the raw materials. All of them are adequate and informative, and their coefficients are significant. The increase in the yield of fractions boiling up to 400 °C is associated with the transformations of hydrocarbons during cavitation. The possibility of evaluating the effectiveness of cavitation treatment of petroleum raw materials based on data on its group hydrocarbon composition has been established. Several regression models have been constructed linking the increase in yield with the pressure during processing and the content of resins and oils in the raw materials. All of them are adequate and informative, and their coefficients are significant. Based on the constructed models, it is assumed that the change in the fractional composition of petroleum products during cavitation treatment is more associated with the destruction of the transition and solvate layers of complex structural units of the oil dispersed system than with the course of cracking reactions.

Key words: oil and oil products, cavitation, fractional composition, group composition, regression models, assessment of impact effectiveness

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы фиксируются существенные изменения в сырьевой базе для производства жидких углеводородных топлив, связанные с увеличением в общем объеме добычи доли тяжелых, высокосмолистых нефтей [1]. О масштабах этих изменений можно судить по тому, что в XXI веке в ГОСТах увеличили число типов нефтей (по их плотности) с 3 до 5 (ГОСТ Р 51858-2002, ГОСТ 31378-2009, ГОСТ Р 51858-2020), отдельно выделив при этом битуминозную нефть. Добыча таких нефтей, подготовка их к транспортировке и дальнейшая переработка требует новых технологических подходов, один из которых предполагает создание в среде жидких углеводородов явления кавитации. Для этого предлагают использовать ультразвук, комбинировать гидроакустическое и электрическое воздействие, создавать кавитацию в гидродинамическом потоке [2-3]. В результате снижается вязкость и плотность нефти, изменяется ее фракционный состав – возрастает выход фракций, выкипающих до 400 °С [4-6]. Явление кавитации также предлагается использовать для повышения глубины переработки «традиционных» нефтей, в том числе и активации нефтяных фракций перед термическими и термокаталитическими процессами [2, 3, 7].

Изменение физико-химических характеристик нефти и ее отдельных фракций объясняют тем, что при схлопывании кавитационных пузырьков возможно локальное повышение температуры среды до 10000 К и давления до 1000 МПа [8-10]. Предполагают, что это приводит к разрушению сложных структурных единиц (ССЕ), составляющих дисперсную фазу темных фракций, в результате чего вязкость нефтепродукта снижается. Для предотвращения (замедления) релаксации реологических свойств, в ряде работ предлагается вводить в систему растворитель или поверхностно-активные вещества [11, 12].

Изменение фракционного состава нефти связывают с крекингом нативных углеводородов [2, 6, 13]. В результате образования углеводородов меньшей молекулярной массы снижаются температуры начала кипения и вспышки углеводородов. Кавитационная обработка прямогонных мазутов позволяет повысить выход фракций, выкипающих до 350 °С, от 4-7 до 15-20% [2, 14]. В работе [5] указывается, что после такой обработки тяжелой нефти выход светлых продуктов возрос до 80%.

Вместе с тем, информация об изменениях физико-химических характеристик нефти и ее отдельных фракций в результате кавитационной обработки носит констатационный характер. Авторы только фиксируют изменения (в ряде случаев противоречивые) и предлагают версии для их объяснения [15-18]. Работ, в которых предпринимались бы попытки прогнозировать возможные изменения, основываясь на характеристиках сырья и условиях его обработки, нам выявить не удалось. Между тем такие исследования необходимы для промышленной реализации процесса.

Целью данной работы являлось установление взаимосвязи между физико-химическими характеристиками сырья (плотностью, фракционным и групповым углеводородным составом), условиями его кавитационной обработки (давлением обработки) и достигаемыми результатами (выход фракций, выкипающих до 400 °С), построение математических моделей, позволяющих прогнозировать результаты.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве показателя, по которому оценивалась эффективность обработки, рассматривался выход фракций, выкипающих до 400 °С

В дальнейшем этот показатель будем называть «выход» и обозначать R. В качестве характеристик исходного сырья учитывался выход целевых фракций до обработки (R0), плотность сырья (d), его групповой состав (содержание в сырье асфальтенов, смол, насыщенных и ароматических углеводородов).

Кавитационную обработку сырья проводили в дезинтеграторе высокого давления. В аппарате поршневым насосом прокачивают жидкость через цилиндр с регулируемым диаметром выходного патрубка. При прохождении через патрубок скорость потока возрастает, а его давление снижается (эффект Вентури), в результате этого происходит испарение низкокипящих компонентов смеси, и возникают кавитационные пузырьки. За патрубком скорость потока снижается, его давление увеличивается, а пузырьки кавитации схлопываются с выделением энергии. Подробно устройство аппарата описано в работе [19]. Основываясь на результатах, опубликованных в работе [18], число циклов обработки было выбрано равным 5, а давление в нагнетательном цилиндре (давление обработки) варьировали от 20 до 50 МПа.

Объектами исследования являлись прямогонные нефтепродукты, а также продукты вторичной переработки нефти:

- мазут прямогонный установки ЭЛОУ-АВТ-6 завода АО «Газпромнефть-МНПЗ» (М1);
 - мазут прямогонный завода ООО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез» (М2);
 - гидроочищенный вакуумный газойль с секции 100 установки Г-43-107 завода АО «Газпромнефть-МНПЗ» (ГВГ);
 - фракция 270-420 °С с установки Г-43-107 завода АО «Газпромнефть-МНПЗ» (ГКК1).
 Некоторые их физико-химические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические характеристики объектов исследования

Table 1. Physico-chemical characteristics of research objects

Показатель	Образец			
	М1	М2	ГВГ	ГКК1
Плотность, г/см ³	0,9542	0,9346	0,9059	1,0024
Групповой состав, % масс.				
Асфальтены	4,4	3,7	0,0	0,0
Смолы	13,3	8,4	3,9	1,8
Масла, в т.ч.	82,3	87,9	96,1	98,2
Насыщенные углеводороды	38,5	61,9	79,1	29,3
Ароматические углеводороды	43,8	26,0	17,0	68,9
Выход фракций, выкипающих в интервале T _{нк} -350 °С	6,9	17,0	5,6	55,5
Выход фракций, выкипающих до 400 °С, % масс.	20,9	35,0	41,1	95,2

Групповой состав сырья определяли в соответствии с методикой [20]. Погрешность при параллельных измерениях составляла (в среднем) 3,5% отн. Фракционный состав исходного и обработанного сырья определяли перегонкой под вакуумом, плотность – пикнометрическим методом при 20 °С.

Для построения математических моделей также использовались результаты работ [21, 22] о влиянии условий кавитационной обработки мазутов (М3, М4, М5), вакуумного газойля (ВГ) и газойля каталитического крекинга (ГКК2) на выход фракций, выкипающих до 400 °С. Характеристики этих образцов приведены в табл. 2.

Для образца М5 также имелись данные о его групповом составе (% масс.): содержание асфальтенов – 10,4%; содержание смол – 32,4%; содержание масел – 57,2% (из которых 20,2% приходится на насыщенные углеводороды, а 37,0% – на ароматические) [23].

Таблица 2

Физико-химические характеристики образцов, исследованных в работах [21, 22]

Table 2. Physico-chemical characteristics of the samples studied in [21, 22]

Показатель	Образец				
	ВГ	М3	М4	М5	ГКК2
Плотность, г/см ³	0,8998	0,9478	0,9617	0,9684	1,1002
Выход фракций, % масс.					
T _{нк} -350 °С	8,4	13,2	13,2	5,0	5,2
350-400 °С	34,5	15,8	10,9	9,0	25,8
400-480 °С	40,9	47,0	23,2	28,0	
Свыше 480 °С	16,2	24,0	24,1	58,0	69,0

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние давления, при котором проводилась обработка темных нефтепродуктов, на выход целевых фракций показано в табл. 3.

Таблица 3

Влияние давления обработки на выход фракций, выкипающих до 400 °С, % масс.

Table 3. The effect of processing pressure on the yield of fractions boiling up to 400 °С, % weight.

Образец	Давление обработки, МПа				
	0	20	30	40	50
М1	20,9	22,8	23,5	24,3	24,6
М2	35,0	37,0	38,1	39,0	40,5
ГВГ	41,1	44,2	46,3	48,2	49,8
ГКК1	95,2	97,0	98,0	98,7	99,2
М3	29,0	36,3	37,8	39,1	40,9
М4	24,1	32,0	Нет данных	Нет данных	38,8
М5	14,0	23,2	25,7	27,2	27,0
ВГ	42,9	46,5	49,0	50,9	52,7
ГКК2	31,0	41,8	45,8	50,7	55,5

Для всех рассмотренных образцов отмечается линейная зависимость между выходом фракций, выкипающих до 400 °С, и условиями обработки, но коэффициенты этих зависимостей для различных образцов различаются. Это может быть связано с характеристиками образцов – их плотностью, групповым углеводородным составом, выходом целевых фракций до обработки.

Ряд регрессионных моделей, связывающих выход целевых фракций (R) с характеристиками сырья (R0, d) и условиями обработки, а также параметры этих моделей приведены в табл. 4. Чтобы диапазоны, в которых изменяются исходные данные, не влияли на коэффициенты моделей, была выполнена их линейная нормализация (данные переведены в диапазон от 0 до 1) [24].

Таблица 4

Линейные регрессионные модели, связывающие характеристики сырья (R_0 , d) и условия его обработки (p), с выходом целевых фракций (R)

Table 4. Linear regression models linking the characteristics of raw materials (R_0 , d) and the conditions of its processing (p), with the yield of target fractions (R)

№	Модель	Коэффициент детерминированности R^2	Расчетные значения критерия Стьюдента для коэффициентов модели	
	Описание			
1	$R=0,94 \cdot R_0+0,28 \cdot p$	0,99	28,33	6,83
2	$R=0,91 \cdot R_0+0,06 \cdot p+0,08$	0,96	25,14	2,37 4,28
3	$R=0,93 \cdot R_0+0,1 \cdot p+0,16 \cdot d$	0,99	35,56	5,77 6,69
4	$R=0,9 \cdot R_0+0,06 \cdot p+0,13 \cdot d+0,05$	0,98	34,81	3,35 5,45 3

Таблица 5

Линейные регрессионные модели, описывающие влияние группового состава образцов на увеличение выхода фракций, выкипающих до 400 °С, после кавитационного воздействия

Table 5. Linear regression models describing the effect of the group composition of samples on the increase in the yield of fractions boiling up to 400 °C after cavitation exposure

№	Модель	Коэффициент детерминированности R^2	Расчетные значения критерия Стьюдента для коэффициентов модели	
6	$\Delta R=0,23 \cdot p+0,59 \cdot ns$	0,85	3,13	6,46
7	$\Delta R=0,29 \cdot p-0,62 \cdot nm+0,56$	0,7	2,69	-5,62 5,67
8	$dR=0,14 \cdot p+0,8 \cdot ns-0,1$	0,9	2,11	11,5 -2,16

Стоит отметить, что наибольший вклад вносят значения выхода целевой фракции до обработки. Попытки не учитывать давление приводили к неадекватности моделей. Можно считать, что эти факторы оказывают определяющее влияние на выход целевых фракций. Учет плотности исходного сырья не приводил к улучшению моделей. Формально наилучшей является 1-я модель. Отсутствие свободного члена в этой модели означает, что при нулевых значениях факторов отклик будет равен нулю.

Для этой модели был применен метод скользящего контроля [25], когда один из образцов исключался из исходных данных, по оставшимся данным строилась модель и по ней рассчитывался выход для исключенного образца. Хотя для образца ГВГ погрешность прогноза составила 22%, средняя погрешность прогнозирования по всем образцам составила 11%. Для малого числа образ-

цов полученная погрешность скользящего контроля является приемлемой.

Также были рассмотрены модели, в которых в качестве отклика рассматривалось не абсолютное значение выхода (R), а его изменение, абсолютное (ΔR) или относительное (dR). Адекватной оказалась только одна из них (5):

$$\Delta R = -0,31 \cdot R_0 + 0,3 \cdot p + 0,55 \cdot d \quad (5)$$

Для этой модели (1) коэффициент детерминированности равен 0,83, все ее коэффициенты значимы (значения критерия Стьюдента -3,42; 6,7; 5,32 соответственно). Особенность этой модели заключается в обратной зависимости прироста выхода от его исходного значения: чем больше выход целевой фракции был до обработки, тем меньше он увеличивался в результате воздействия.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности прогнозирования эффективности кавитационной обработки сырья

(выхода фракций, выкипающих до 400 °С) на основании данных о характеристиках сырья (начального выхода и плотности) и условиях обработки.

Анализ публикаций, посвященных кавитационному воздействию на углеводородные среды, позволял допускать, что изменения выхода могут быть связаны с углеводородным составом сырья.

Нужно отметить, что информация о групповом углеводородном составе имела только для 5 образцов, что значительно осложняло построение моделей.

В табл. 5 представлены модели и их параметры, связывающие возрастание выхода (в абсолютном и относительном выражении) с условиями обработки (p) и содержанием в сырье смол (ns) и масел (nm).

Анализируя эти результаты, нужно отметить прямую зависимость между увеличением выхода и содержанием в сырье смол, и обратную – с содержанием масел. Это позволяет предполагать, что увеличение выхода фракций, выкипающих до 400 °С, после кавитационной обработки тяжелого нефтяного сырья в большей степени связано с разрушением сольватного слоя ССЕ, чем с реакциями крекинга. Из этого следует, что проводить кавитационную обработку нефтепродуктов предпочтительнее непосредственно перед их фракционированием, иначе, в результате явлений релаксации [11, 12], выход целевого продукта может снизиться.

В связи с тем, что имеется однозначная взаимосвязь между содержанием в сырье смол и масел, в моделях для прогнозирования увеличения выхода целесообразнее использовать только один из этих параметров. Из табл. 4 видно, что модель абсолютного увеличения выхода, основанная на содержании смол, более информативна, поэтому следует пользоваться именно этой моделью. Для

относительного увеличения выхода удалось построить только одну модель со значимыми коэффициентами. Хотя информативность этой модели высока, значения критерия Стьюдента для ее коэффициентов близки к пороговым. Низкая значимость коэффициентов регрессионной модели может быть связана как с недостаточным количеством образцов, так и с их индивидуальными особенностями – отсутствием асфальтенов в некоторых из них, различном соотношении насыщенных и ароматических углеводородов в масляных фракциях. Для дальнейших исследований необходимо получить дополнительные данные.

ВЫВОДЫ

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о возможности оценки эффективности кавитационной обработки тяжелых нефтепродуктов (увеличения выхода фракций, выкипающих до 400 °С) на основании данных о фракционном и групповом углеводородном составе сырья. Также они позволяют говорить о том, что изменение фракционного состава темных нефтепродуктов [26, 27] после их кавитационной обработки в большей степени связано с разрушением переходного и сольватного слоя сложных структурных единиц нефтяной дисперсной системы, чем с реакциями крекинга.

Авторы выражают благодарность д.б.х., проф. Воробьеву Сергею Ивановичу за предоставленное для исследований оборудование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors express their gratitude to Grand PhD in Biology prof. Vorobyov Sergey Ivanovich for the equipment provided for research.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Жданев О.В., Чубоксаров В.С.** Техническая политика нефтегазовой отрасли России: задачи и приоритеты. *Энергет. политика*. 2020. № 5 (147). С. 76-91. DOI: 10.46920/2409-5516_2020_5147_76.
2. **Винокуров В.А., Фролов В.И., Крестовников М.П., Лесин С.В., Шишкин Ю.Л.** Исследование влияние волнового воздействия на нефти. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2012. № 8. С. 3-8.
3. **Торховский В.Н., Воробьев С.И., Антонюк С.Н., Чижевская Е.В., Николаева М.В., Арнацкий В.А., Стружанова Е.М.** Инновационные технологии углублённой переработки нефтяного сырья. Сб. тр. Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты. Белгород. 2018. С. 60-67.

REFERENCES

1. **Zhdaneev O.V., Chuboksarov V.S.** Technical policy of the Russian oil and gas industry: objectives and priorities. *Energet. Politika*. 2020. N 5 (147). P. 76-91 (in Russian). DOI: 10.46920/2409-5516_2020_5147_76.
2. **Vinokurov V.A., Frolov V.I., Krestovnikov M.P., Lesin S.V., Shishkin Yu.L.** Study of the influence of wave action on oil. *Neftepererabotka Neftekhim*. 2012. N 8. P. 3-8 (in Russian).
3. **Torkhovskiy V.N., Vorobyov S.I., Antonyuk S.N., Chizhevskaya E.V., Nikolaeva M.V., Arnatskiy V.A., Struzhanova E.M.** Innovative technologies for advanced processing of petroleum raw materials. Sat. tr. Non-traditional natural resources, innovative technologies and products. Belgorod. 2018. P. 60-67 (in Russian).

4. Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Байзитов В.М., Баранов Д.А., Новоторцев В.М., Еременко И.Л. Изучение воздействия кавитации на реологические свойства тяжелой нефти. *Оборуд. и технол. для нефтегаз. комплекса*. 2011. № 5. С. 24-27.
5. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестн. ТГТУ*. 2008. Т. 14. № 4. С. 861-869.
6. Золотухин В.А. Новая технология для переработки тяжелой нефти и осадков нефтеперерабатывающих производств. *Хим. и нефтегаз. машиностр.* 2004. № 10. С. 8-11.
7. Пивоварова Н.А. Использование волновых воздействий в переработке углеводородного сырья (обзор). *Нефтехимия*. 2019. Т. 59. № 7. С. 727-738. DOI: 10.1134/S002824211907013X.
8. Иваницкий Г.К. Численное моделирование динамики пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации. *Совр. наука: иссл., идеи, рез-ты, технол.* 2011. № 2 (7). С. 52-58.
9. Bhangu S.K., Ashokkumar M. Theory of Sonochemistry. *Top. Curr. Chem.* 2016. V. 374 (4). N 56. DOI: 10.1007/s41061-016-0054-y.
10. Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S.B., Katti S.S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrason. Sonochem.* 2018. V. 42. P. 493-507. DOI: 10.1016/j.ultrsonch.2017.12.010.
11. Якименко К.Ю., Венгеров А.А., Бранд А.Э. Применение технологии гидродинамической кавитационной обработки высоковязких нефтей с целью повышения эффективности транспортировки. *Фундаментал. иссл.* 2016. № 5-3. С. 531-536.
12. Вершинина С.В., Бранд А.Э., Мостовая Н.А. Обоснование перспективности и целесообразности применения гидродинамической кавитационной обработки в процессе транспорта высоковязкой нефти. *Горн. информ.-аналит. бюлл. (науч.-техн. журн.)*. 2015. № S36. С. 79-85.
13. Кухарчук И.Г. Ультразвуковое воздействие на компоненты углеводородного топлива. *Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. 2015. № 2. С. 77-81.
14. Промтов М.А. Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке. *Вестн. ТГТУ*. 2017. Т. 23. № 3. С. 412-419. DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419.
15. Иванов С.В., Воробьев С.И., Торховский В.Н., Герзелев И.М. Применение гидродинамической кавитации для повышения эффективности каталитического крекинга вакуумного газойля. *Вестн. МИТХТ*. 2013. Т. 8. № 3. С. 67-69.
16. Sawarkar A., Pandit A., Samant S., Joshi J. Use of Ultrasound in Petroleum Residue Upgradation. *Canad. J. of Chem. Eng.* 2009. V. 87. N 3. P. 329-342. DOI: 10.1002/cjce.20169.
17. Zhou C., Wang Y., Huang X., Wu Y., Chen J. Optimization of ultrasonic-assisted oxidative desulfurization of gasoline and crude oil. *Chem. Eng. Proc.: Process Intensif.* 2020. V. 147. P. 107789. DOI: 10.1016/j.cep.2019.107789.
18. Пешнев Б.В., Бурляева Е.В., Терентьева В.Б., Никишин Д.В., Николаев А.И., Андронов К.С. Оценка влияния гидродинамической кавитационной обработки темных нефтепродуктов на выход фракций, выкипающих до 400 °С. *Тонкие хим. технологии*. 2022. Т. 17. № 6. P. 473-482. DOI: 10.32362/2410-6593-2022-17-6-473-482.
4. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Bayazitov V.M., Baranov D.A., Novotortsev V.M., Eremenko I.L. Study of the effect of cavitation on the rheological properties of heavy oil. *Oborud. Tekhnolog. Neftegaz. Kompleksa*. 2011. N 5. P. 24-27 (in Russian).
5. Promtov M.A. Prospects for the use of cavitation technologies for the intensification of chemical technological processes. *Vestn. TGTU*. 2008. V. 14. N 4. P. 861-869 (in Russian).
6. Zolotukhin V.A. New technology for processing heavy oil and refinery sludge. *Khim. Neftegaz. Mashinostr.* 2004. N 10. P. 8-11 (in Russian).
7. Pivovarova N.A. Use of Wave Effect in Processing of the Hydrocarbonic Raw Material (Review). *Petrol. Chem.* 2019. V. 59. N 6. P. 559-569. DOI: 10.1134/S0965544119060148.
8. Ivanitsky G.K. Numerical modeling of the dynamics of a bubble cluster in the processes of hydrodynamic cavitation. *Sovr. Nauka: Issled. Idei, Rez-ty, Tekhnol.* 2011. N 2 (7). P. 52-58 (in Russian).
9. Bhangu S.K., Ashokkumar M. Theory of Sonochemistry. *Top. Curr. Chem.* 2016. V. 374 (4). N 56. DOI: 10.1007/s41061-016-0054-y.
10. Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S.B., Katti S.S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrason. Sonochem.* 2018. V. 42. P. 493-507. DOI: 10.1016/j.ultrsonch.2017.12.010.
11. Yakimenko K.Yu., Vengerov A.A., Brand A.E. Application of technology for hydrodynamic cavitation treatment of high-viscosity oils in order to increase transportation efficiency. *Fund. Issl.* 2016. N 5-3. P. 531-536 (in Russian).
12. Vershinina S.V., Brand A.E., Mostovaya N.A. Justification of the prospects and feasibility of using hydrodynamic cavitation treatment in the process of transporting high-viscosity oil. *Gorny Inform.-Analit. Byull. (nauch.-tekhn. zhurn.)*. 2015. N S36. P. 79-85 (in Russian).
13. Kukharchuk I.G. Ultrasonic influence on hydrocarbon fuel components. *Izv. Nats. Akad. Nauk Belarusi. Ser. Fiz.-Tekhn. Nauk.* 2015. N 2. P. 77-81 (in Russian).
14. Promtov M.A. Changes in the fractional composition of oil during hydropulse cavitation treatment. *Vestn. TGTU*. 2017. V. 23. N 3. P. 412-419 (in Russian). DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419.
15. Ivanov S.V., Vorobiev S.I., Torkhovskiy V.N., Gerzeliev I.M. Application of hydrodynamic cavitation to increase the efficiency of catalytic cracking of vacuum gas oil. *Vestn. MITHT*. 2013. V. 8. N 3. P. 67-69 (in Russian).
16. Sawarkar A., Pandit A., Samant S., Joshi J. Use of Ultrasound in Petroleum Residue Upgradation. *Canad. J. Chem. Eng.* 2009. V. 87. N 3. P. 329-342. DOI: 10.1002/cjce.20169.
17. Zhou C., Wang Y., Huang X., Wu Y., Chen J. Optimization of ultrasonic-assisted oxidative desulfurization of gasoline and crude oil. *Chem. Eng. Proc.: Process Intensif.* 2020. V. 147. P. 107789. DOI: 10.1016/j.cep.2019.107789.
18. Peshnev B.V., Burlyayeva E.V., Terentyeva V.B., Nikishin D.V., Nikolaev A.I., Andronov K.S. Evaluation of the influence of hydrodynamic cavitation treatment of dark petroleum products on the yield of fractions with boiling points up to 400°C. *Tonkie Khim. Tekhnol.* 2022. V. 17. N 6. P. 473-482 (in Russian). DOI: 10.32362/2410-6593-2022-17-6-473-482.
19. Vorobyov S.I., Torkhovskiy V.N., Tutorskiy I.A., Kazmaly I.K. Mechanical destruction of oil hydrocarbons using a high-pressure disintegrator. *Vestn. MITHT*. 2008. V. 3. N 3. P. 78-85 (in Russian).

19. **Воробьев С.И., Торховский В.Н., Тугорский И.А., Казмалы И.К.** Механодеструкция углеводородов нефти с помощью дезинтегратора высокого давления. *Вестн. МИТХТ*. 2008. Т. 3. № 3. С. 78–85.
20. **Сафина И.Р., Ибрагимова Д.А., Яушев Э.А., Хисмиев Р.Р.** Применение метода SARA-анализа для характеристики нефтяных дисперсных систем. *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2014. Т. 17. № 24. С. 212–213.
21. **Пешнев Б.В., Николаев А.И., Терентьева В.Б., Никишин Д.В.** Механохимическая активация нефтяного сырья. Сб. тр. Актуальные проблемы нефтехимии. Москва. 2021. С. 153–157.
22. **Терентьева В.Б., Пешнев Б.В., Николаев А.И.** Гидродинамическая активация тяжёлых нефтяных остатков. *Тонкие хим. технологии*. 2021. Т. 16. № 5. С. 390–398. DOI: 10.32362/2410-6593-2021-5-390-398.
23. **Николаев А.И., Терентьева В.Б., Торховский В.Н., Воробьев С.И.** Получение нефтяного кокса из модифицированного сырья. *АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное Топливо*. 2016. № 7 (112). С. 3–6.
24. **Старовойтов В.В., Голуб Ю.И.** Нормализация данных в машинном обучении. *Информатика*. 2021. Т. 18. № 3. С. 83–96. DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96.
25. **Stone M.** Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions. *J. Royal Stat. Soc.: Ser. B (Methodological)*. 1974. V. 36. N 2. P. 111–133. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x.
26. **Николаев А.И., Пешнев Б.В., Алхамеди М.Х.И.** Кавитационная обработка тёмных нефтепродуктов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 94–99. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6611.
27. **Пешнев Б.В., Николаев А.И., Никишин Д.В., Алхамеди М.Х.И.** Перспективы использования явления кавитации при переработке нефти. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 4. С. 110–116. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6760.
20. **Safina I.R., Ibragimova D.A., Yaushev E.A., Khismiev R.R.** Application of the SARA analysis method to characterize petroleum dispersed systems. *Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ.* 2014. V. 17. N 24. P. 212–213 (in Russian).
21. **Peshnev B.V., Nikolaev A.I., Terentyeva V.B., Nikishin D.V.** Mechanochemical activation of petroleum feedstock. *Sat. tr. Current problems of petrochemistry*. Moscow. 2021. P. 153–157 (in Russian).
22. **Terentyeva V.B., Peshnev B.V., Nikolaev A.I.** Hydrodynamic activation of heavy oil residues. *Tonkie Khim. Tekhnol.* 2021. V. 16. N 5. P. 390–398 (in Russian). DOI: 10.32362/2410-6593-2021-5-390-398.
23. **Nikolaev A.I., Terentyeva V.B., Torhovskiy V.N., Vorobyev S.I.** Production of petroleum coke from modified raw materials. *AvtoGazoZaprovodnyy Kompleks + Al'ternativnoye Topливо*. 2016. N 7 (112). P. 3–6 (in Russian).
24. **Starovoitov V.V., Golub Yu.I.** Data normalization in machine learning. *Informatika*. 2021. V. 18. N 3. P. 83–96 (in Russian). DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96.
25. **Stone M.** Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions. *J. Royal Stat. Soc.: Ser. B (Methodological)*. 1974. V. 36. N 2. P. 111–133. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x.
26. **Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Alhamedy M.H.I.** Cavitation treatment of watered oil products. *ChemChemTech [Izv. Vyssh.Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 7. P. 94–99. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6611.
27. **Peshnev B.V., Nikolaev A.I., Nikishin D.V., Alhamedy M.Kh.I.** Prospects of using the cavitation phenomenon in oil refining. *ChemChemTech [Izv. Vyssh.Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 4. P. 110–116. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6760.

Поступила в редакцию 27.10.2023

Принята к опубликованию 23.01.2024

Received 27.10.2023

Accepted 23.01.2024