

УДК 665.6

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-157-164>

EDN ZMHSIV



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Изменение углеводородного состава нефтепродуктов под воздействием кавитации

А.И. Николаев, Б.В. Пешнев, А.Н. Королев✉, Д.В. Никишин

МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), Москва, 119454 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: waterpolist2000@yandex.ru

Аннотация

Цели. Интерес к применению явления кавитации для обработки углеводородных смесей, в частности нефти и нефтепродуктов, и отсутствие в литературе системного подхода к проведению подобных исследований открывает необходимость более глубокого изучения влияния этого физического воздействия на характеристики и детальный углеводородный состав нефтяного сырья. В связи с этим, цель данной работы заключается в изучении влияния условий, при которых возникает кавитация, на изменение физико-химических свойств и углеводородного состава нефти и нефтепродуктов.

Методы. В качестве объектов исследования были взяты два образца нефти и четыре прямогонные фракции — бензиновая, керосиновая, дизельная и мазут, обладающие различными характеристиками и углеводородным составом. Кавитационную обработку проводили в гидродинамическом режиме на аппарате Донор-2 в диапазоне перепадов давления от 20 до 50 МПа. Количество циклов обработки составляло от 1 до 20. Плотность определяли пикнометрическим методом, показатель преломления — на рефрактометре типа Аббе, а фракционный состав или выход фракций — перегонкой при атмосферном или пониженном давлении соответственно для светлых или темных нефтепродуктов. Углеводородный состав бензиновой фракции определяли хромато-масс-спектрометрическим методом.

Результаты. В работе показано изменение плотности и фракционного состава объектов исследования после их обработки при различных условиях. Уделено особое внимание углеводородному составу бензиновой фракции: показано увеличение содержания в ней нормальных алканов за счет увеличения количества структур, обладающих меньшей длиной углеродной цепи, по сравнению с компонентами сырья, не подвергнутого кавитационному воздействию.

Выводы. Представлены результаты исследования влияния кавитационной обработки нефти и ее отдельных фракций на изменение физико-химических характеристик объектов исследования. Установлено, что характер изменений зависит от условий обработки и исходных характеристик образца. Высказано предположение о том, что в результате кавитационного воздействия могут протекать процессы крекинга и уплотнения. Возможность протекания реакций крекинга подтверждена результатами хроматографии и определения группового углеводородного состава образцов.

Ключевые слова

нефть, нефтепродукты, кавитация, углеводородный состав, классы углеводородов

Поступила: 16.12.2024

Доработана: 11.07.2025

Принята в печать: 13.02.2026

Для цитирования

Николаев А.И., Пешнев Б.В., Королев А.Н., Никишин Д.В. Изменение углеводородного состава нефтепродуктов под воздействием кавитации. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(2):157–164. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-157-164>

RESEARCH ARTICLE

Changes in the hydrocarbon composition of petroleum products under the influence of cavitation

Alexandr I. Nikolaev, Boris V. Peshnev, Alexandr N. Korolev✉, Denis V. Nikishin

MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119454 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: waterpolist2000@yandex.ru

Abstract

Objectives. While the phenomenon of cavitation is of interest for treatment of hydrocarbon mixtures, in particular crude oil and petroleum products, the literature lacks a systematic approach to conducting such research. This gap stimulates the need for a more in-depth study of the influence of this physical effect on the characteristics and detailed hydrocarbon composition of petroleum feedstock. Thus, the present work set out to explore the influence of the conditions leading to cavitation on the physicochemical properties and hydrocarbon composition of crude oil and petroleum products.

Methods. The objects of the study were two crude oil samples and four straight-run fractions—gasoline, kerosene, diesel, and fuel oil—having different characteristics and hydrocarbon compositions. Cavitation treatment was carried out in a hydrodynamic mode using a Donor-2 apparatus within a range of pressure changes from 20 to 50 MPa. The number of treatment cycles was from 1 to 20. The density was determined by pycnometry using the refractive index, an Abbe refractometer, and the fractional composition or fraction yield, as well as by distillation at atmospheric or reduced pressure for light or dark petroleum products, respectively. The hydrocarbon composition of the gasoline fraction was determined by chromatography and mass spectrometry.

Results. Changes in the densities and fractional compositions of the objects of study following their treatment under various conditions were recorded. Particular attention was paid to the hydrocarbon composition of the gasoline fraction: an increase in the content of normal alkanes was shown to be due to an increase in the number of structures with shorter carbon chains in comparison with the components of raw materials not subjected to cavitation.

Conclusions. The results of the study of the effect of cavitation treatment of crude oil and its individual fractions on their physicochemical characteristics showed that the nature of the changes depends on the treatment conditions and the initial characteristics of the sample. It is suggested that cavitation treatment causes cracking and compaction processes. The possibility of cracking reactions was confirmed by chromatographic determination of the group hydrocarbon composition of the samples.

Keywords

crude oil, petroleum products, cavitation, hydrocarbon composition, classes of hydrocarbons

Submitted: 16.12.2024

Revised: 11.07.2025

Accepted: 13.02.2026

For citation

Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Korolev A.N., Nikishin D.V. Changes in the hydrocarbon composition of petroleum products under the influence of cavitation. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(2):157–164. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-2-157-164>

ВВЕДЕНИЕ

Чередование областей высокого и низкого давлений в жидкой среде приводит к возникновению явления кавитации — образованию и схлопыванию пузырьков газа [1, 2]. Изучение этого явления позволило рассматривать его не только как разрушающее гребные винты судов и лопасти турбин гидроэлектростанций, но и эффективно использовать в сельском хозяйстве [3], медицине [4], пищевой промышленности [5], строительстве [6] и нефтяной отрасли [7–9].

В нефтедобывающей и нефтеперерабатывающих отраслях явление кавитации используют для изменения реологических характеристик нефти и ее

фракций, что обеспечивает снижение вязкости нефтяных дисперсных систем и, соответственно, затрат на их транспортировку [10], повышение выхода светлых фракций [11] и качества углеводородных топлив [12]. Указывается также на возможность использования кавитации для интенсификации химико-технологических процессов [13]. Вместе с тем, при всем многообразии публикаций, посвященных использованию кавитации в процессах нефтепереработки, в них не прослеживается системный подход, позволяющий связать условия, приводящие к возникновению кавитационных явлений, и фиксируемые изменения характеристик сырья, особенно его углеводородного состава.

Целью данной работы является изучение влияния условий, приводящих к возникновению кавитации, на изменение характеристик и углеводородного состава нефти и нефтепродуктов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования в работе использовались образцы тяжелой (Н1) и легкой (Н2) нефти Ильского месторождения (Краснодарский край, Россия), прямогонные бензиновая (Б), керосиновая (К), дизельная (Д) фракции нефти и мазут (М), предоставленные АО «Газпромнефть-МНПЗ» (Россия), некоторые характеристики которых приведены в табл. 1.

Кавитационную обработку проводили в аппарате марки Донор-2 (Россия) [14, 15]. В данном аппарате кавитация возникает в гидродинамическом потоке при перетекании нефтепродукта под действием повышенного давления через диффузор. Давление в нагнетательном цилиндре варьировали от 20 до 50 МПа, а количество циклов воздействия изменяли от 1 до 20. Температура, при которой проводилась обработка, определялась вязкостью образцов. Обработку образцов Б, К и Д проводили при 20°C, Н1 и Н2 — при 50°C, а образца М — при 70°C.

Плотность образцов определяли пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ Р 50.2.075-2010¹.

Фракционный состав светлых нефтепродуктов определялся в соответствии с ГОСТ 2177-99².

Таблица 1. Характеристики объектов исследования

Table 1. Characteristics of research objects

Показатель Indicator	Объект исследования Research object					
	Н1 O1*	Н2 O2	Б G	К K	Д D	М F
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	0.9693	0.8810	0.7112	0.7880	0.8333	0.9684
Показатель преломления Refractive index	–	–	1.4345	1.4501	1.4709	–
Температура начала кипения, °C Initial boiling point, °C	160	56	40	144	175	290
Температура выкипания, °C Distillation point, °C						
10 об. % / 10 vol %	–	–	71	162	213	–
50 об. % / 50 vol %			116	192	280	
90 об. % / 90 vol %			186	218	335	
Выход фракций, мас. % Yield of fractions, wt %						
До 160°C / Up to 160°C	–	11.9				–
160–230°C	0.5	19.2				–
230–350°C	5.2	19.5	–	–	–	4.9
350–400°C	93.4	49.4				9.3
400–480°C	93.4	49.4				27.9
Выше 480°C / Above 480°C	93.4	49.4				57.9

* O1, heavy crude oil; O2, light crude oil; G, gasoline; K, kerosene; D, diesel; and F, fuel oil.

¹ ГОСТ Р 50.2.075-2010. Государственная система обеспечения единства измерений. Нефть и нефтепродукты. Лабораторные методы измерения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API. М.: Стандартинформ; 2011. [GOST R 50.2.075-2010. State system for ensuring the uniformity of measurements. Crude petroleum and petroleum products. Laboratory methods for determination of density, relative density and API gravity. Moscow: Standartinform; 2011.]

² ГОСТ 2177-99. Межгосударственный стандарт. Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава. М.: Стандартинформ; 2006. [GOST 2177-99. Interstate Standard. Petroleum products. Methods for determination of distillation characteristics. Moscow: Standartinform; 2006.]

Для этого использовался аппарат марки АРНП-1 (НПП «СКИФ-ПРИБОР», Украина). Выход темных фракций нефти и мазута определяли разгонкой под вакуумом при остаточном давлении ~2 мм.рт.ст. [16].

Углеводородный состав бензиновой фракции определялся с использованием хроматографа марки Agilent GC 7890 на кварцевой капиллярной колонке HP-5MS (30 м × 0.25 мм × 0.25 мкм) фирмы Agilent Technologies (США) с модифицированной метилсиликоновой (5% фенилметилсиликона) жидкой неподвижной фазой. Хроматограф оборудован масс-селективным детектором MSD 5975C (Agilent Technologies, США) с квадрупольным анализатором масс. Масс-спектры получали ионизацией методом электронного удара с энергией ионизации 70 эВ и регистрировали в диапазоне масс 29–550 а.е.м. Условия проведения анализа: температура испарителя — 320°C, объемная скорость потока газа носителя (гелия) — 1 мл/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее наглядно изменение характеристик нефтепродукта под воздействие кавитации проявляется в изменении плотности образца (рис. 1) и его фракционного состава. Например, температуры начала кипения образцов Н1, М и Б после 5 циклов обработки при давлении 50 МПа понизились на 30, 25 и 8°C соответственно. При этом прослеживается следующая закономерность: чем выше начальные значения плотности нефтепродукта, тем более заметны изменения его физико-химических характеристик (плотности, фракционного состава и т.п.).

Отмечено существенное влияние природы образца на характер изменения его показателей при

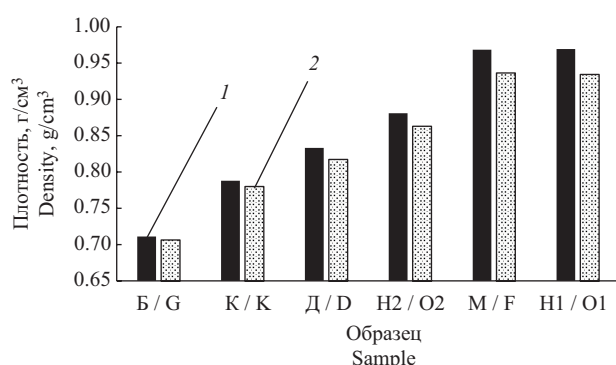


Рис. 1. Влияние кавитационной обработки на плотность образцов. 5 циклов обработки при 50 МПа. (1) Плотность образца до обработки; (2) плотность образца после обработки

Fig. 1. Influence of cavitation treatment on the density of samples in five treatment cycles at 50 MPa: sample density (1) before and (2) after treatment

изменении условий обработки. Увеличение давления и количества циклов обработки (до 10) образца М приводило к снижению температуры начала кипения, плотности и увеличению выхода фракций, выкипающих до 400°C. Выходы фракций, выкипающих выше 400°C, при этом снижались. Например, после одного цикла обработки при давлении 20 МПа, температура начала кипения образца М снизилась с 290 до 287°C, а выход фракций, выкипающих до 400°C, возрос с 14.4 до 14.8 мас. %. После 10 циклов обработки эти показатели составляли соответственно 273°C и 23.4 мас. %. Если же обработка проводилась при 50 МПа, то после 10 циклов воздействия температура начала кипения понизилась до 257°C, а выход фракций, выкипающих до 400°C, возрос до 29.2 мас. %. При дальнейшем увеличении количества циклов обработки существенных изменений не фиксировалось.

При обработке светлых фракций (Б, К, Д) температура начала их кипения также снижалась по мере повышения давления и количества циклов обработки. Характер изменения плотности этих образцов от давления обработки был аналогичен зафиксированному для образца М — повышение давления приводило к большему снижению их плотности. В то же время было отмечено существенное отличие характера изменения плотности светлых продуктов от количества циклов обработки. В отличие от образца М при повторных обработках плотность светлых нефтепродуктов начинала увеличиваться (рис. 2).

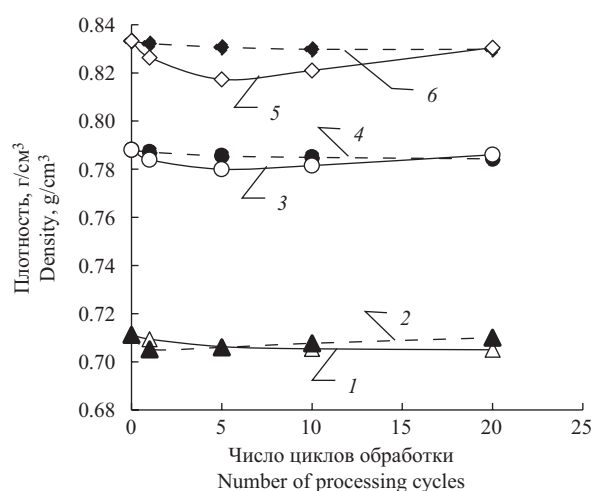


Рис. 2. Влияние условий кавитационной обработки светлых нефтепродуктов на изменение их плотности: образцы (1, 2) Б, (3, 4) К, и (5, 6) Д при давлении обработки (1, 3, 5) 20 и (2, 4, 6) 50 МПа

Fig. 2. Influence of conditions of cavitation treatment of light petroleum products on their density: Samples G (1, 2), K (3, 4), and D (5, 6) at treatment pressures of 20 (1, 3, 5) and 50 MPa (2, 4, 6)

Количество циклов обработки, после которых фиксировалось возрастание плотности, зависело от природы образца (его исходной плотности) и давления обработки. Например, при давлении обработки 30 МПа у образцов Б и К плотность увеличилась после 10 циклов. Для образца Д говорить об изменении плотности после 10 циклов обработки при таком давлении затруднительно. После 10 циклов обработки его плотность была равна 0.8293 г/см³, после 20 — 0.8295 г/см³. Однако при повышении давления обработки образца Д до 40 МПа, уже после 10 циклов обработки, фиксировалось увеличение его плотности (после 5 циклов плотность была равна 0.8298 г/см³, после 10 — 0.8294 г/см³, а после 20 — 0.8301 г/см³). При давлении обработки 50 МПа увеличение плотности образца Д было отмечено уже после пятого цикла.

Аналогичный характер изменений характеристик светлых нефтепродуктов при увеличении количества циклов обработки отмечен и для их коэффициентов рефракций. У образцов Б и К увеличение числа циклов обработки до 10 (при давлении 30 МПа) приводило к снижению коэффициента рефракции до 1.4185 и 1.4408 соответственно. После 20 циклов обработки эти значения были равны 1.4205 и 1.4422. При давлении 50 МПа коэффициент рефракции образца Б после 5 циклов обработки был равен 1.4205, а после 10 циклов он увеличился до 1.4225.

Достоинством является влияние числа циклов обработки на фракционный состав светлых нефтепродуктов и температуры выкипания соответствующих объемов образца. Температуры начала кипения образцов Б, К и Д снижались как при увеличении давления, так и при увеличении числа циклов обработки. При обработке этих образцов при давлении 20 МПа по мере увеличения числа циклов воздействия снижались также температуры отгона 10, 20, ..., 95 об. % загрузки. Если же обработка проводилась при больших давлениях, то после первоначального снижения (после 1–5 циклов), последующая обработка приводила к повышению температур выкипания 40% и более образца (рис. 3).

Для образца Д повышение температур выкипания фиксировалось только при давлениях обработки 40 и 50 МПа, и чем выше было давление обработки, тем раньше начиналось это повышение температур. Так, если обработка проводилась при 40 МПа, после 10 циклов воздействия было отмечено повышение температуры выкипания после отгона 60% образца. Если же обработка проводилась при 50 МПа, то после 10 циклов повышение температуры выкипания было зафиксировано после отгона 40% образца.

Влияние условий проведения обработки на фракционный состав образцов Б и К было аналогичным. При этом повышение температур выкипания после

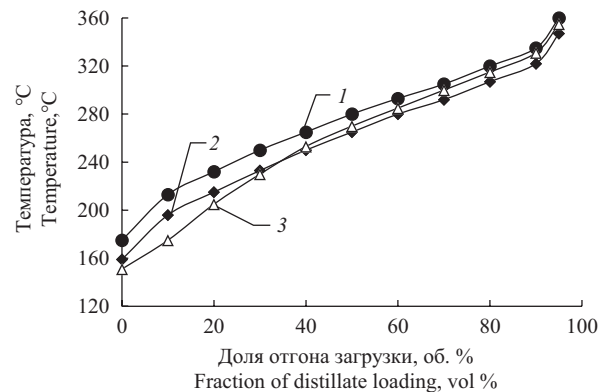


Рис. 3. Влияние количества циклов обработки (давление 50 МПа) на фракционный состав образца Д. (1) Исходный образец; (2) 10 циклов обработки при давлении 50 МПа; (3) 20 циклов обработки при давлении 50 МПа

Fig. 3. Influence of the number of treatment cycles (pressure 50 МПа) on the fractional composition of Sample D: (1) initial sample and the sample after (2) 10 and (3) 20 treatment cycles at a pressure of 50 МПа

отгона 40% загрузки фиксировалось и при давлении обработки 30 МПа.

Снижение плотности образцов в результате их кавитационной обработки, температур начала кипения, фракционного состава может быть объяснено протеканием реакций крекинга под воздействием тепла, выделяющегося при схлопывании пузырьков кавитации [17]. Образовавшиеся при этом углеводороды меньшей молекулярной массы снижают все перечисленные показатели. Взаимодействие долгоживущих радикалов приводит к образованию продуктов с молекулярной массой большей, чем у исходного сырья. Проявляется это в повышении температур выкипания соответствующих объемов загрузки и наиболее заметно при обработке легких низкокипящих фракций. В случае обработки темных нефтепродуктов такие изменения не фиксируются, но для фракций, выкипающих при температуре выше 480°C, отмечено увеличение плотности после кавитационного воздействия [14, 18].

В табл. 2 и на рис. 4 приведены данные о групповом углеводородном составе образца Б и количестве атомов углерода в молекулах алканов до и после обработки (5 циклов при давлении 50 МПа), подтверждающие протекание реакций крекинга.

Стоит отметить, что в результате кавитационной обработки в образце изменилось соотношение алканов нормального, изостроения и нафтенов. Доля *n*-алканов увеличилась, а содержание изоалканов и нафтенов снизилось. Зафиксировано увеличение содержания насыщенных углеводородов с 6–8 атомами углерода в молекуле и снижение структур с 10–12 атомами углерода. Изменения содержания аренов не отмечено.

Таблица 2. Влияние обработки на групповой углеводородный состав образца Б. Условия обработки: 5 циклов при давлении 50 МПа

Table 2. Effect of treatment on the group hydrocarbon composition of Sample G after 5 treatment cycles at a pressure of 50 MPa

Углеводороды Hydrocarbons	Групповой углеводородный состав образца Б, мас. % Group hydrocarbon composition of sample G, wt %	
	До обработки Before treatment	После обработки After treatment
Всего алканов Total alkanes	75.0	73.9
<i>n</i> -Алканы <i>n</i> -Alkanes	22.6	25.8
<i>изо</i> -Алканы <i>iso</i> -Alkanes	20.0	18.0
Циклоалканы Cycloalkanes	32.4	30.1
Арены Arenes	22.5	22.6
Не идентифицированные Not identified	2.5	3.5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты подтверждают протекание реакций крекинга при кавитационной обработке углеводородов. В результате образуются продукты меньшей и большей молекулярной массы, чем исходное сырье. Они также позволяют предположить, что наибольшая стабильность в условиях кавитации присуща углеводородам аренового ряда, в то время как алканы изостроения и нафтены более подвержены деструкции.

Вклад авторов

А.И. Николаев — разработка идеи и концепции исследования, формулировка цели и задач исследования, определение объектов исследования, анализ литературных источников и полученных результатов, написание и редактирование текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. *Струи, следы и каверны*: пер. с англ. М.: Мир; 1964, 466 с.
2. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. *Кавитация*: пер. с англ. М.: Мир; 1974, 687 с.
3. Шестаков С.Д. *Основы технологии кавитационной дезинтеграции. Теория кавитационного реактора и ее приложения в производстве хлебопродуктов*. М.: ЕВА-пресс; 2001, 173 с.

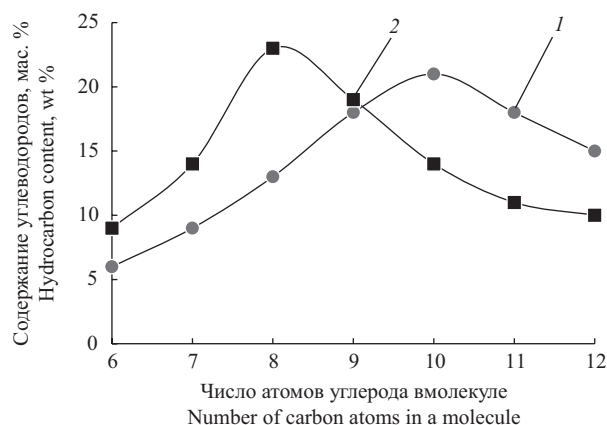


Рис. 4. Распределение алканов по числу атомов углерода в образце Б до и после обработки. (1) До обработки; (2) после обработки (давление 50 МПа, 5 циклов)

Fig. 4. Distributions of alkanes by number of carbon atoms in Sample G (1) before and (2) after treatment in 5 cycles at a pressure of 50 MPa

Б.В. Пешнев — анализ литературных источников, написание и редактирование текста статьи, разработка методологии, анализ и представление полученных результатов.

А.Н. Королев — проведение экспериментов, анализ и обработка полученных экспериментальных данных, редактирование текста статьи.

Д.В. Никишин — консультация по вопросам методологии и проведения исследования, обеспечение оборудованием и консультация по приборной базе, редактирование текста статьи.

Authors' contributions

A.I. Nikolaev — development of the idea and concept of the study, formulation of the purpose and objectives of the study, identification of research objects, analysis of literary sources and obtained results, writing and editing the text of the article.

B.V. Peshnev — analysis of literary sources, writing and editing of the text of the article, development of methodology, analysis and presentation of the results obtained.

A.N. Korolev — conducting experiments, analysis and processing of the experimental data obtained, editing the text of the article.

D.V. Nikishin — consulting on methodology and research, providing equipment and consulting on the instrument base, editing the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

1. Birkhoff G., Zarantello E.H. *Strui, sledy i kaverny (Jets, Wakes and Cavities)*: transl. from Engl. Moscow: Mir; 1964, 466 p. (In Russ.).
[Birkhoff G., Zarantello E.H. *Jets, Wakes and Cavities*. New York: Academic Press; 1957, 353 p.]
2. Knapp R., Daily J., Hammit F. *Kavitatsiya (Cavitation)*: transl. from Engl. Moscow: Mir; 1974, 687 p. (In Russ.).

- Промтов М.А. *Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика*. М.: Машиностроение-1; 2001, 260 с.
- Думитраш П.Г., Болога М.К., Кучук Т.В., Шемякова Т.Д. Кавитационные технологии при диспергировании и гомогенизации. *Электронная обработка материалов*. 2009;4(258):102–107. <https://elibrary.ru/qyxcrh>, <https://doi.org/10.3103/S1068375509040152>
- Агранат Б.А. *Ультразвуковая технология*. М.: Metallurgiya; 1974, 504 с.
- Хафизов Ф.Ш., Хафизов Н.Ф., Ванчухин Н.П. *Процессы нефтепереработки в кавитационно-вихревых аппаратах*. Уфа: Изд-во Фонда содействия развитию научных исследований; 1999, 110 с.
- Промтов М.А. Изменение фракционного состава нефти при гидромпульсной кавитационной обработке. *Вестник ТГТУ*. 2017;23(3):412–419. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419>
- Воробьев С.И., Торховский В.Н., Титорский И.А., Казмалы И.К. Механодеструкция углеводородов нефти с помощью дезинтегратора высокого давления. *Вестник МИТХТ*. 2008;3(3):77–84.
- Муллагаев М.С., Абрамов В.О., Баязитов В.М., Баранов Д.А., Новоторцев В.М., Еременко И.Л. Изучение воздействия кавитации на реологические свойства тяжелой нефти. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2011;5:24–27. <https://elibrary.ru/oimnnj>
- Галимов Р.А., Мардиншин Р.Н., Харлампыди Х.Э., Дахнави Х.Э. Влияние электромагнитного поля на отбор узких фракций светлых нефтепродуктов. *Вестник Казанского технологического университета*. 2010;5: 171–177. <https://elibrary.ru/motyed>
- Промтов М.А. Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2008;2:6–8. <https://elibrary.ru/ilgqdp>
- Иванов С.В., Воробьев С.И., Торховский В.Н., Герзелиев И.М. Применение гидродинамической кавитации для повышения эффективности каталитического крекинга вакуумного газойля. *Вестник МИТХТ*. 2013;8(3): 67–69. <https://elibrary.ru/qgslud>
- Терентьева В.Б., Пешнев Б.В., Николаев А.И. Гидродинамическая активация тяжелых нефтяных остатков. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(5):390–398. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-398>
- Николаев А.И., Пешнев Б.В., Алхамеди М.Х.И. Кавитационная обработка обводненных нефтепродуктов. *Известия высших учебных заведений. Химия и хим. технология*. 2022;65(7): 94–99. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226507.6611>
- Рыбак Б.М. *Анализ нефти и нефтепродуктов*. М.: Гостоптехиздат; 1962, 888 с.
- Avvaru V., 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;42:493–507. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.010>
- Пешнев Б.В., Николаев А.И., Никишин Д.В., Алхамеди М.Х.И. Перспективы использования явления кавитации при переработке нефти. *Известия высших учебных заведений. Химия и хим. технология*. 2023;66(4): 110–116. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236604.6760>
- [Knapp R., Daily J., Hammit F. *Cavitation*. McGraw-Hill; 1970, 567 p.]
- Shestakov S.D. *Osnovy tekhnologii kavitatsionnoi dezintegratsii. Teoriya kavitatsionnogo reaktora i ee prilozheniya v proizvodstve khleboproduktov (Fundamentals of Cavitation Disintegration Technology: Theory of the Cavitation Reactor and its Applications in Bakery Production)*. Moscow: EVA-Press; 2011, 173 p. (In Russ.).
- Promtov M.A. *Pul'satsionnye apparaty rotornogo tipa: teoriya i praktika (Pulsating rotary devices: Theory and practice)*. Moscow. Mashinostroenie-1; 2001, 260 p. (In Russ.).
- Dumitrash P.G., Bologa M.K., Kuchuk T.V. et al. Cavitation technologies for dispergation and homogenization. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2009;45(4):342–345. <https://doi.org/10.3103/S1068375509040152> [Original Russian Text: Dumitrash P.G., Bologa M.K., Kuchuk T.V., Shemyakova T.D. Cavitation technologies for dispergation and homogenization. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2009;4(258):102–107 (in Russ.). <https://elibrary.ru/qyxcrh>]
- Agranat B.A. *Ul'trazvukovaya tekhnologiya (Ultrasonic Technology)*. Moscow: Metallurgiya; 1974, 504 p. (In Russ.).
- Khafizov F.Sh., Khafizov N.F., Vanchukhin N.P. *Protssesy neftepererabotki v kavitatsionno-vikhrevykh apparatakh (Oil Refining Processes in Cavitation-Vortex Devices)*. Ufa; 1999, 110 p. (In Russ.).
- Promtov M.A. Change in fractional composition of oil in hydro-pulse cavitation processing. *Vestnik TGTU = Transactions TSTU*. 2017;23(3):412–419 (in Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419>
- Vorobyev S.I., Torhovskiy V.N., Tutorskiy I.A., Kazmaly I.K. Mechaniodestruction of raw oil hydrocarbons by high-pressure disintegrator. *Vestnik MITHT*. 2008;3(3):77–84 (in Russ.).
- Mullakaev M.S., Abramov V.O., Bayazitov V.M., Baranov D.A., Novotortsev V.M., Eremenko I.L. Studying of cavitation impact on heavy oil rheological characteristics. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa = Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2011;5:24–27 (in Russ.). <https://elibrary.ru/oimnnj>
- Galimov R.A., Mardanshin R.N., Kharlampidi Kh.E., Dakhnavi Kh.E. The influence of electromagnetic field on the selection of narrow fractions of light petroleum products. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Herald of the Kazan Technological University*. 2010;5: 171–177 (in Russ.). <https://elibrary.ru/motyed>
- Promtov M.A. Cavitation technology for quality improvement of hydrocarbon fuels. *Chem. Petrol. Eng.* 2008;44(1-2): 63–66. <https://doi.org/10.1007/s10556-008-9014-x> [Original Russian Text: Promtov M.A. Cavitation technology for quality improvement of hydrocarbon fuels. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2008;2:6–8 (in Russ.). <https://elibrary.ru/ilgqdp>]
- Ivanov S.V., Vorobyev S.I., Torhovskiy V.N., Gerzeliev I.M. The application of hydrodynamic cavitation to increase the efficiency of the catalytic cracking of vacuum gas oil. *Vestnik MITHT* 2013;8(3):67–69 (in Russ.). <https://elibrary.ru/qgslud>
- Terenteva V.B., Peshnev B.V., Nikolaev A.I. Hydrodynamic activation of heavy oil residues. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(5):390–398. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-398>
- Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Alhamedy M.H.I. Cavitation treatment of watered oil products. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khim. Tekhnologiya = ChemChemTech*. 2022;65(7):94–99. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226507.6611>
- Rybak B.M. *Analiz nefi i nefteproduktov (Analysis of Oil and Petroleum Products)*. Moscow: Gostoptekhizdat; 1962, 888 p. (In Russ.).

17. 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;42:493–507. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.010>
18. Peshnev B.V., Nikolaev A.I., Nikishin D.V., Alhamedi M. Kh.I. Prospects of using the cavitation phenomenon in oil refining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khim. Tekhnologiya = ChemChemTech.* 2023;66(4):110–116. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236604.6760>

Об авторах

Николаев Александр Игоревич, д.т.н., профессор, кафедра химии и технологии основного органического синтеза, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nikolaev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 57197582338, <https://orcid.org/0000-0001-8594-2985>

Пешнев Борис Владимирович, д.т.н., профессор, кафедра химии и технологии основного органического синтеза, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: peshnev@mirea.ru. Scopus Author ID 6507362823, <https://orcid.org/0000-0002-0507-2754>

Королев Александр Николаевич, аспирант, кафедра химии и технологии основного органического синтеза, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: waterpolist2000@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2709-3342>

Никишин Денис Васильевич, ассистент, кафедра химии и технологии основного органического синтеза, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nikishin@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4089-6391, <https://orcid.org/0000-0002-4466-4402>

About the Authors

Alexander I. Nikolaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: nikolaev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 57197582338, <https://orcid.org/0000-0001-8594-2985>

Boris V. Peshnev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: peshnev@mirea.ru. Scopus Author ID 6507362823, <https://orcid.org/0000-0002-0507-2754>

Alexandr N. Korolev, Postgraduate Student, Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: waterpolist2000@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2709-3342>

Denis V. Nikishin, Assistant, Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: nikishin@mirea.ru. RSCI SPIN-code 4089-6391, <https://orcid.org/0000-0002-4466-4402>