

**ПРЕВРАЩЕНИЕ КОРОТКОЦЕПНЫХ *n*-АЛКАНОВ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ****В.Н. Торховский¹, С.Н. Антонюк^{1,@}, С.И. Воробьев², М.В. Николаева¹**

¹Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

²Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Москва 119991, Россия

@Автор для переписки, e-mail: antonyuk2006@yandex.ru

Наличие в нефтяном и газоконденсатном сырье углеводородов парафинового ряда (*n*-алканов) во многом определяет структуру и свойства нефтяных дисперсных систем (НДС). Короткоцепные *n*-алканы (C_8 – C_{17}) входят в состав дисперсионной среды НДС. При переработке нефти они концентрируются в дистиллятных фракциях и влияют на эксплуатационные характеристики товарных моторных топлив. В работе исследовали влияние гидродинамической кавитации на короткоцепные *n*-алканы. Источником кавитации служил дезинтегратор высокого давления ДА-1. Давление сжатия, создаваемое плунжерным насосом в ДА-1, составляло 50 МПа, кавитационное воздействие осуществляли последовательно три раза. Объект исследования – нефтяной жидкий парафин, содержащий 96.5% масс. *n*-алканов C_9 – C_{21} (в том числе 88.2% масс. C_{14} – C_{17}) и 2.5% масс. изоалканов C_{10} – C_{20} , остальное – примеси углеводородов других классов. Результаты ГЖХ показали, что суммарная конверсия исходных *n*-алканов C_{14} – C_{17} не велика, но устойчиво возрастала: после первого цикла кавитации она составила 1.4%, после второго – 2.7%, после третьего – 3.6%. При наибольшей конверсии содержание *n*-алканов C_8 – C_{13} в нефтяном жидком парафине увеличилось на 1.9% масс. (28% отн.), *n*-алканов C_{18} – C_{22} – на 0.6% масс. (36% отн.). Полученная информация позволит прогнозировать, каким образом наличие в нефтяном и газоконденсатном сырье короткоцепных *n*-алканов скажется на изменении его углеводородного и фракционного состава после кавитации.

Ключевые слова: гидродинамическая кавитация, короткоцепные *n*-алканы, диспропорционирование, изомеризация.

**TRANSFORMATION OF SHORT-CHAIN *n*-ALKANES
UNDER TREATMENT OF HYDRODYNAMIC CAVITATION****V.N. Torkhovsky¹, S.N. Antonyuk^{1,@}, S.I. Vorobyev², M.V. Nikolaeva¹**

¹Moscow Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow 119991, Russia

@Corresponding author e-mail: antonyuk2006@yandex.ru

The structure and properties of oil disperse systems (ODS) are mainly determined by the presence of paraffin hydrocarbons (*n*-alkanes) in the crude oil and natural gas liquid. Short-chain *n*-alkanes (C_8 – C_{17}) are part of ODS dispersion medium. Under oil refining treatment, they concentrate in the distillate fractions and influence the operation characteristics of product liquid fuels and natural gas liquid. We studied the influence of hydrodynamic cavitation on the short-chain *n*-alkanes. Cavitation was produced by a high pressure disintegrator DA-1. A plunger pump produced compression pressure 50 MPa. Cavitation treatment was applied three times in a row. The research object was liquid oil paraffin containing 96.5% wt. *n*-alkanes C_9 – C_{21} (including 95% wt. C_9 – C_{17}) and 2.5% wt. isoalkanes C_{10} – C_{20} ; the balance was a mixture of other hydrocarbons. The results of GLC demonstrated that the total conversion of initial *n*-alkanes C_{14} – C_{17} was not high, but it grew

*growing constantly: after the 1st cavitation cycle – 1.4%, after the 2nd cavitation cycle – 2.7%, after the 3rd one – 3.6%. At the highest conversion, the concentration of *n*-alkanes C_8 – C_{13} in liquid oil paraffin increased by 28% rel., and the concentration of *n*-alkanes C_{18} – C_{22} – by 36% rel. The information obtained allows predicting the influence of the short-chain *n*-alkanes present in the oil feed on alterations of its hydrocarbon and fraction composition after cavitation.*

Keywords: hydrodynamic cavitation, short-chain *n*-alkanes, disproportioning, isomerization.

Повышение глубины переработки жидкого углеводородного сырья (нефтяного и газоконденсатного) является актуальной задачей. Исследования, направленные на улучшение характеристик и увеличение выхода ценных дистиллятов – базовых компонентов для выработки качественных товарных нефтепродуктов, проводят с применением различных физических методов активации (модификации) сырья.

Так, для переработки нефтяных остатков в присутствии катализатора (оксид алюминия) использовали механохимическое воздействие [1] в планетарной мельнице (АГО-3). После перегонки активированного остатка наблюдали незначительное увеличение выхода фракции НК – 320 °С, концентрации в нефти ароматических углеводородов C_8 – C_{10} , а также *n*-алканов C_{16} – C_{17} и C_{29} – C_{32} ; содержание *n*-алканов C_6 – C_{15} и C_{18} – C_{28} в сырье снизилось.

В работе [2] лазерному воздействию ($\lambda = 980 \pm 5$ нм, мощность излучения 92.9 мВт) подвергали прямую бензиновую фракцию 31–160 °С, выделенную из газового конденсата. Установлено, что под воздействием лазерного излучения наибольшим превращениям подверглись *n*- и изоалканы C_7 – C_{11} . Высокой конверсии этих компонентов достигнуто не было при ожидаемом увеличении октанового числа на 5-7 единиц.

Углубленная переработка углеводородов, выделенных из нефтешламов, по традиционным технологиям возможна с привлечением предварительной обработки сырья физическими методами (СВЧ-обработка). В работе [3] изучали процесс каталитического крекинга углеводородов, выделенных из донных осадков шламонакопителей. Их состав (% масс.): вода – 1.8; механические примеси – 1.14; сера – 2.03; парафиновые углеводороды – 39.9; нафтеновые – 32.5; ароматические – 27.6. Активацию нефтешлама проводили высокочастотным электромагнитным излучением. Активированный нефтешлам подвергали каталитическому крекингу при температуре 500 °С в присутствии промышленного высококремнеземного катализатора ДА-250. После активации нефтешлама в течение 4 ч при крекинге выход фракции, выкипающей до 360 °С, составил 79% масс. против ~67% масс. в исходном сырье.

Эффект от воздействия физических факторов, использованных в работах [1–3], в значительной степени связан с превращением углеводородов парафинового ряда, содержащихся в сырье. По со-

временным представлениям о физикохимии нефти, наличие *n*-алканов различной молекулярной массы влияет на формирование структуры и свойств нефтяных дисперсных систем (НДС), а также на образование асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче, транспорте и хранении нефтяного сырья [4]. В зависимости от числа атомов углерода в молекуле *n*-алканов последние делят на короткоцепные (C_8 – C_{17}), среднецепные (C_{18} – C_{40}) и длинноцепные (C_{41} – C_{100}) [5].

За счет выделившейся энергии при воздействии кавитации происходит разрыв связей С–С и С–Н в молекулах *n*-алканов с образованием свободных радикалов, реакции которых определяют состав и свойства конечных продуктов [6–10]. Кавитационное воздействие на более сложное по составу нефтяное сырье при последующем использовании традиционных термических (термокаталитических) технологий дает возможность повысить выход ценных продуктов и таким образом увеличить глубину переработки нефти [11–13]. В настоящее время в нашей стране и за рубежом разработка кавитационных технологий для нефтепереработки представляет не только научный интерес, но и имеет коммерческую привлекательность [13–15].

Средне- и длинноцепные *n*-алканы при нормальных (близких к комнатной) и пониженных температурах находятся в дисперсной фазе НДС. Воздействие единичного импульса (одного цикла) гидродинамической кавитации на среднецепные алканы C_{21} – C_{38} (в виде 5%-го раствора твердого парафина в *n*-додекане) исследовали с использованием дезинтегратора ДА-1 при давлении сжатия ($P_{сж}$) 30–35 МПа [9]. По данным ГЖХ, после кавитации в составе парафина появилось 3.1–4.9% масс. углеводородов C_6 – C_{20} , конкретное количество которых зависело от начальной температуры раствора. Указанные продукты реакции образовались за счет кавитационного разложения алканов C_{25} – C_{35} . Подтверждением этого может служить тот факт, что включение в состав нефти, содержание парафина в которой составляло 0.5% масс., расплава упомянутого парафина (до 6.5% масс.) при атмосферно-вакуумной перегонке после кавитации привело к повышению выхода керосино-газойлевой фракции 200–360 °С на 3.4% масс. и к увеличению в ней на 3.8% масс. концентрации *n*-алканов C_{13} – C_{20} [9].

Короткоцепные *n*-алканы входят в состав дисперсионной среды НДС. При переработке нефти они концентрируются в дистиллятных фракциях и

в значительной степени определяют свойства вырабатываемых моторных топлив. Результаты, полученные в работе [10] при воздействии единичного импульса кавитации на алканы C_{13} – C_{15} при более высоком, чем в работе [9], $P_{сж}$ (50 МПа), нельзя рассматривать в широком плане, распространяя их на все короткоцепные *n*-алканы. Их, скорее всего, следует трактовать как частный случай превращения примесных соединений (*n*- $C_{13}H_{28}$ с концентрацией 0.22% масс. и *n*- $C_{15}H_{32}$ с концентрацией 0.13% масс., а также монометилтридеканов с суммарным содержанием 2.19% масс.) в растворителе – *n*- $C_{14}H_{30}$, концентрация которого в исходной смеси составляла 97.46% масс. Показано, что часть примесных соединений участвовала в реакции диспропорционирования (*n*-алканы $C_{13}H_{28}$ и $C_{15}H_{32}$ между собой) и изомеризации (каждый из монометилтридеканов). В обеих реакциях конечным продуктом являлся *n*- $C_{14}H_{30}$. Соединений, содержащих в молекуле менее 13 и более 15 атомов углерода, после кавитации обнаружено не было. Таким образом, и в [9], и в [10] короткоцепные *n*-алканы при кавитационном воздействии являлись продуктами реакции, а не реагентами.

В настоящей работе продолжено изучение влияния гидродинамической кавитации на короткоцепные *n*-алканы для получения надежных результатов, основанных на превращениях более широкого круга

соединений этого гомологического ряда. Полученная информация позволит прогнозировать, каким образом наличие в нефтяном и газоконденсатном сырье короткоцепных *n*-алканов скажется на изменении его углеводородного и фракционного состава после кавитации.

Экспериментальная часть

Объектом исследования служил нефтяной жидкий парафин, выработанный по ТУ 0255-024-05766480-2006 на ООО ПО «Киришинефтеоргсинтез». Кавитационное воздействие осуществляли в дезинтеграционном аппарате ДА-1. В отличие от [10], для достижения глубоких превращений жидкую фракцию подвергали кавитации последовательно три раза. Состав фракции до и после кавитации определяли с помощью ГЖХ. Принцип работы ДА-1 и методика анализа описаны в [9, 10].

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлен полный групповой углеводородный состав жидкого нефтяного парафина.

В табл. 2 приведено содержание *n*- и изоалканов в узких по составу фрагментах групп парафина. Отдельно следует охарактеризовать примеси углеводородов других классов, входящих в состав парафина.

Таблица 1. Групповой углеводородный состав фракции жидкого нефтяного парафина (% масс.)

Углеводороды	Начальный состав	После кавитационного воздействия		
		Один цикл	Два цикла	Три цикла
<i>n</i> -Алканы	96.55	96.35	95.69	95.84
Изоалканы	2.55	2.47	3.11	2.96
Циклоалканы	0.27	0.14	0.12	0.10
Ароматические соединения	0.55	0.78	0.69	0.73
Гибридные соединения	0.08	0.10	0.33	0.29
Моноолефины	-	0.16	0.06	0.08
Всего	100.00	100.00	100.00	100.00

Таблица 2. Содержание *n*- и изоалканов в составе фракции жидкого нефтяного парафина (% масс.)

Углеводороды	Начальный состав	После кавитационного воздействия		
		Один цикл	Два цикла	Три цикла
<i>n</i> - C_8H_{18}	-	-	-	0.01
изо- C_8H_{18}	-	-	-	-
<i>n</i> - C_9H_{20}	0.01	0.01	0.03	0.04
изо- C_9H_{20}	-	-	-	0.01
<i>n</i> - $C_{10}H_{22}$ – <i>n</i> - $C_{13}H_{28}$	6.74	7.37	7.89	8.57
изо- $C_{10}H_{22}$ – изо- $C_{13}H_{28}$	0.52	0.39	0.54	0.66
<i>n</i> - $C_{14}H_{30}$ – <i>n</i> - $C_{17}H_{36}$	88.23	86.99	85.80	85.10
изо- $C_{14}H_{30}$ – изо- $C_{17}H_{36}$	1.00	1.21	1.88	0.66
<i>n</i> - $C_{18}H_{38}$ – <i>n</i> - $C_{20}H_{42}$	1.32	1.67	1.63	1.73
изо- $C_{18}H_{38}$ – изо- $C_{20}H_{42}$	1.03	0.87	0.35	1.26
<i>n</i> - $C_{21}H_{44}$	0.25	0.31	0.28	0.32
изо- $C_{21}H_{44}$	-	-	0.34	0.13
<i>n</i> - $C_{22}H_{46}$	-	-	0.06	0.07
изо- $C_{22}H_{46}$	-	-	-	0.21
Всего	99.10	98.82	98.80	98.77

Ароматические соединения изначально представлены десятью алкилпроизводными бензола C₉–C₁₁, содержание каждого из которых составляет 0.01–0.08% масс. Кроме этого, присутствуют 1,3- и 2,7-диметилнафталины с суммарной концентрацией 0.15% масс. После кавитационного воздействия других ароматических соединений не обнаружено, менялось лишь содержание упомянутых углеводородов.

Циклоалканы в парафине – производные циклогексана с содержанием от 3 до 7 атомов углерода в двух-трех алкильных заместителях.

Соединения смешанного строения (гибридные) во всех образцах парафина до и после кавитации присутствуют в виде диметилтетрагидронафталинов.

Непредельные соединения, образовавшиеся при кавитации, в основном – тетрадецены с меняющимся (3, 7 и 4) положением двойной связи в молекулах в зависимости от условий кавитации.

Из приведенных в табл. 1 и 2 данных видно, что суммарная концентрация *n*- и изоалканов в исходном образце парафина составляла примерно 99% масс. и практически не изменялась после каждого цикла кавитационного воздействия. Заметно изменилось соотношение между группами *n*- и изоалканов, содержащими C₈–C₁₃, C₁₄–C₁₇ и C₁₈–C₂₂ атомов углерода в молекулах. Трансформация состава парафина за счет кавитации выразилась также в изменении соотношения между *n*- и изоалканами внутри упомянутых выше групп углеводородов (см. табл. 2).

Можно также отметить некоторое увеличение содержания в парафине моноолефинов (реакция дегидрирования) и появление в нем после 2-го и 3-го циклов кавитации низкомолекулярных *n*-алканов C₈ и изоалканов C₉, а также их высокомолекулярных гомологов C₂₁–C₂₂. Изменение концентрации в парафине других, помимо алканов, углеводородов (суммарно их примерно 1% масс.) могло быть вызвано протеканием вторичных реакций, приводящих к выделению водорода.

При анализе зависимостей, характеризующих одновременное изменение (в основном, снижение) в этой смеси концентраций индивидуальных *n*-алканов C₁₄–C₁₇ (реагентов), можно установить, что степень превращения каждого из них по мере увеличения числа циклов кавитации не была одинаковой и постоянной (рис. 1).

После трех циклов кавитации конверсия *n*-алканов составила (%): *n*-C₁₆H₃₄ – 6.9; *n*-C₁₄H₃₀ – 3.5; *n*-C₁₅H₃₂ – 1.9; *n*-C₁₇H₃₆ – 1.5.

Приведенные в табл. 1 и 2 результаты дают основание считать, что основные направления превращения короткоцепных *n*-алканов связаны с реакциями диспропорционирования, где n = 14–17, x = 3–6:

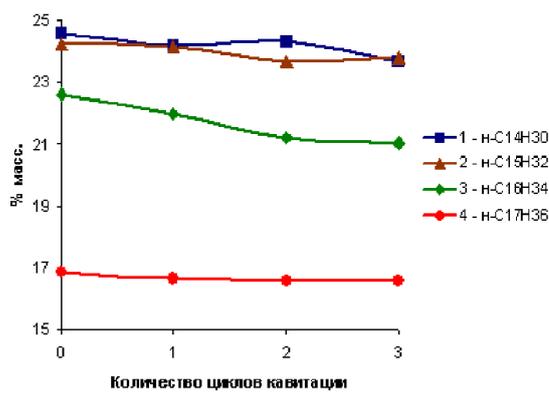
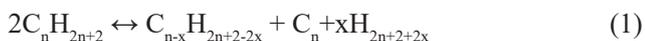


Рис. 1. Изменение концентрации индивидуальных *n*-алканов C₁₄–C₁₇ в зависимости от условий кавитации в ДА-1.

и изомеризации



Анализ графических зависимостей (рис. 1) показывает, что равновесие реакции (1), в зависимости от условий кавитации, сдвигается как в сторону образования продуктов реакции (в подавляющем большинстве), так и в противоположном направлении (после второго цикла кавитации для *n*-C₁₄H₃₀ и после третьего – для *n*-C₁₅H₃₂). Об обратимом характере реакции изомеризации (2) можно судить по данным, содержащимся в табл. 1 и 2.

Влияние условий кавитации на содержание в жидком парафине *n*-алканов C₁₁–C₁₃ (n < 14) представлено на рис. 2, об изменении концентрации их гомологов C₁₈–C₂₂ (n > 14) можно судить по данным, приведенным в табл. 2.

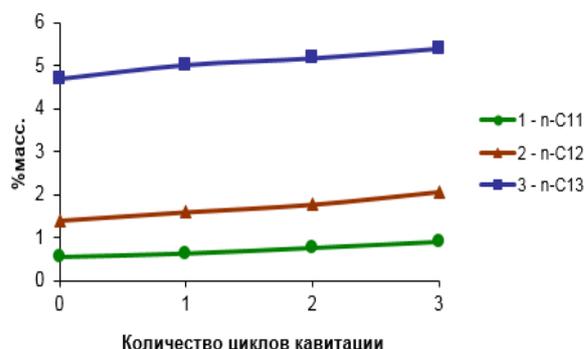
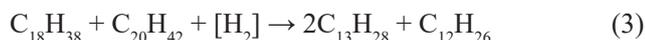


Рис. 2. Изменение концентрации индивидуальных *n*-алканов C₁₁–C₁₃ в зависимости от условий кавитации в ДА-1.

Видно, что наблюдаемый результат (число молей сопоставляемых соединений) не соответствует ожидаемому по реакции 1. В связи с этим можно предположить наличие промежуточных реакций, в которых относительно более высокомолекулярные *n*-алканы C_{18+} превращаются в низкомолекулярные соединения. Таковыми могут быть, например, реакции, протекающие по механизму «конденсация – деление»:



Реакции, приводящие к увеличению числа молей продуктов, требуют дополнительного количества водорода. При отсутствии внешнего источника последнего необходимо его количество для реакций

Список литературы:

1. Дудкин Д.В., Кульков М.Г., Шестакова Е.Н., Якубенюк А.А., Новиков А.А. Переработка нефтяных остатков в условиях механохимического воздействия // *Химия и технология топлив и масел*. 2012. № 4. С. 34–37.
2. Завалинская И.С., Чиж Д.В., Ясьян Ю.П. Изменение свойств нефтяных фракций при лазерном воздействии // *Химия и технология топлив и масел*. 2014. № 1. С. 9–11.
3. Колесников И.М., Фролов В.И., Борзаев Х.Х., Глотов А.П., Кардашев С.В. Математическое моделирование каталитического крекинга нефтешлама, подвергнутого электромагнитной активации // *Химия и технология топлив и масел*. 2015. № 6. С. 16–20.
4. Сафиева Р.З. Физикохимия нефти. Физико-химические основы технологии переработки нефти. М.: Химия, 1998. 448 с.
5. Патрикеев Г.А. Структурный подход при изучении физических свойств жидких *n*-алканов и полиметиленов // *ДАН СССР*. 1975. Т. 221. № 1. С. 134–137.
6. Нестеренко А.И., Берлизов Ю.С., Берлизова Ю.Ю. Расчет средневзвешенного числа циклов кавитационной интенсификации крекинга нефтяного сырья // *Химия и технология топлив и масел*. 2009. № 2. С. 47–50.
7. Нестеренко А.И., Берлизов Ю.С. Моделирование влияния кавитации на крекинг углеводородов нефти // *Химия и технология топлив и масел*. 2012. № 1. С. 35–40.
8. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. // *Вестник ТГТУ*. 2008. Т. 14. № 4. С. 861–868.
9. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Егорова Е.В., Антонюк С.Н., Городский С.Н. Превращение

3 и 4 получено за счет дегидрирования части алканов линейного и циклического строения (см. табл. 1).

Полученные в настоящей работе результаты подтвердили и дополнили информацию о характере основных направлений превращения (обратимые реакции диспропорционирования и изомеризации) короткоцепных *n*-алканов под влиянием гидродинамической кавитации в ДА-1, полученную ранее [10]. Присутствие таких углеводородов в составе нефти и газового конденсата позволяет за счет гидродинамической кавитации несколько повысить содержание *n*- и изоалканов $C_{18}-C_{22}$ (пределы выкипания 310–370 °С) и, в большей степени, C_8-C_{13} (выкипают в диапазоне 125–235 °С).

Исследования проводили в рамках выполнения Государственного задания Минобрнауки РФ. Шифр «Катализатор». Код проекта 10.8454.2017/БЧ.

References:

1. Dudkin D.V., Kul'kov M.G., Shestakova E.N., Yakubenok A.A., Novikov A.A. Processing of oil residues under mechano-chemical treatment // *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel (Chemistry and Technology of Fuels and Oils)*. 2012. № 4. P. 34–37. (in Russ.).
2. Zavalinskaya I.S., Chizh D.V., Yasyan Yu.P. Changes of properties of oil fractions under laser treatment // *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel (Chemistry and Technology of Fuels and Oils)*. 2014. № 1. P. 9–11. (in Russ.).
3. Kolesnikov I.M., Frolov V.I., Borzaev H.H., Glotov A.P., Kardashev S.V. Math modeling of oil sludge catalytic cracking, which was treated by electromagnetic activation. // *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel (Chemistry and Technology of Fuels and Oils)*. 2015. № 6. P. 16–20 (in Russ.).
4. Safieva R.Z. Oil physics and chemistry. Physical and chemical basics of oil processing technology. M.: Khimiya Publ., 1998. 448 p. (in Russ.).
5. Patrikeev G.A. Structured approach to study physical properties of liquid *n*-alkanes and polymethylenes // *DAN SSSR (Reports of Science Academy of USSR)*. 1975. V. 221. № 1. P. 134–137 (in Russ.).
6. Nesterenko A.I., Berlizov Yu.S., Berlizova Yu.Yu. Calculation of average weighted amount of cavitation cycles for stimulation of oil feed cracking. // *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel (Chemistry and Technology of Fuels and Oils)*. 2009. № 2. P. 47–50 (in Russ.).
7. Nesterenko A.I., Berlizov Yu.S. Simulation of cavitation influence on the cracking of the oil hydrocarbons. // *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel (Chemistry and Technology of Fuels and Oils)*. 2012. № 1. P. 35–40. (in Russ.).
8. Promtov M.A. Prospects of cavitation technologies application for stimulation of chemical technology processes. // *Vestnik TGTU (Reports of TGTU)*. 2008. V.14. № 4. P. 861–868. (in Russ.).

алканов под действием единичного импульса гидродинамической кавитации. II. Поведение среднецепных алканов $C_{21}-C_{38}$ // Вестник МИТХТ. 2014. Т. 9. № 4. С. 59–69.

10. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Егорова Е.В., Иванов С.В., Городский С.Н. Превращение алканов под действием единичного импульса гидродинамической кавитации. I. Поведение алканов $C_{13}-C_{15}$ // Вестник МИТХТ. 2013. Т. 8. № 6. С. 27–36.

11. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Антонюк С.Н., Егорова Е.В., Иванов С.В., Кравченко В.В., Городский С.Н. Использование многоциклового кавитации для интенсификации переработки нефтяного сырья // Технологии нефти и газа. 2015. № 2. С. 9–17.

12. Нестеренко А.И., Берлизов Ю.С. Увеличение глубины переработки нефти путем кавитационной интенсификации крекинга нефтепродуктов // Вопросы химии и хим. технологии. 2015. Т. 2 (100). С. 92–103.

13. 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. Т. 8. № 3. С. 67–69.

14. Курочкин А.К., Хазеев Р.Р. Экспериментальный поиск перспективной технологии глубокой переработки ашальгинской сверхвязкой нефти // Сфера. Нефть и газ. 2016. № 2 (52). С. 62–79.

15. Фомичев-Замилов М. Новая технология upgrade битума // Oil&Gas Journal Russia. 2015. February. P. 66–71.

9. Torkhovskiy V.N., Vorobyev S.I., Egorova E.V., Antonyuk S.N., Gorodskiy S.N. Conversion of alkanes under influence of single impulse of hydrodynamic cavitation. II. Behavior of middle-chain alkanes $C_{21}-C_{38}$ // Vestnik MITHT (Fine Chemical Technologies). 2014. V. 9. № 4. P. 59–69. (in Russ.).

10. Torkhovskiy V.N., Vorobyev S.I., Egorova E.V., Ivanov S.V., Gorodskiy S.N. Conversion of alkanes under influence of single impulse of hydrodynamic cavitation. I. Behavior of alkanes $C_{13}-C_{15}$ // Vestnik MITHT (Fine Chemical Technologies). 2013. V. 8. № 6. P. 27–36. (in Russ.).

11. Torkhovskiy V.N., Vorobyev S.I., Antonyuk S.N., Egorova E.V., Ivanov S.V., Kravchenko V.V., Gorodskiy S.N. Application of multicycle cavitation for stimulation of oil processing // Tekhnologii nefti i gaza (Oil and Gas Technologies). 2015. № 2. P. 9–17. (in Russ.).

12. Nesterenko A.I., Berlizov Yu.S. Increasing depth of oil processing using cavitation stimulation of petrochemicals cracking // Voprosi khimii i khimicheskoy tekhnologii (Chemistry and Chemical Technology topics). 2015. V. 2 (100). P. 92–103. (in Russ.).

13. Ivanov S.V., Vorobyev S.I., Torkhovskiy V.N., Gerzeliev I.M. Application of hydrodynamic cavitation in order to increase efficiency of catalytic cracking of vacuum gasoil // Vestnik MITHT (Fine Chemical Technologies). 2013. V. 8. № 3. P. 67–69. (in Russ.).

14. Kurochkin A.K., Khazeev R.R. Experimental research for promising technology of deep processing of Ashalgin super viscous oil // Sfera. Neft' i gaz (Sphere. Oil and Gas). 2016. № 2 (52). P. 62–79. (in Russ.).

15. Fomichev-Zamilov M. New technology of bitumen upgrade // Oil & Gas Journal Russia. 2015. February. P. 66–71. (Translation to Russ. by D. Kazakov).

Об авторах:

Торховский Валерий Николаевич, кандидат технических наук, главный специалист кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Антонюк Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Воробьев Сергей Иванович, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России, (119991, Россия, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2).

Николаева Марина Вячеславовна, студентка кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

About authors:

Valery N. Torkhovskiy, Ph.D. (Engineering), Chief Specialist of the A.N. Bashkirov Chair of Technology of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Sergey N. Antonyuk, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the A.N. Bashkirov Chair of Technology of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Sergey I. Vorobyev, Dr.Sc. (Biology), Professor, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (8-2, Trubetskaya St., 119991, Moscow, Russia).

Marina V. Nikolaeva, Student, A.N. Bashkirov Chair of Technology of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).