

УДК 532.133+534-8

DOI: 10.28999/2541-9595-2024-14-1-8-17

Научная специальность: 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

Влияние ультразвуковой обработки на реологические свойства парафинистой нефти

Е. А. Марфин^{а,б}, А. Р. Галимзянова^а, Р. Н. Гатауллин^а, Р. А. Натфуллин^{а,б}

^а Институт энергетики и перспективных технологий Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН), ул. Лобачевского, 2/31, 420111, Казань, Россия

^б Институт физики Казанского федерального университета, ул. Кремлевская, 18, 420008, Казань, Россия

Аннотация

Тяжелая, высоковязкая нефть с учетом растущего глобального спроса на энергоносители и истощения традиционных запасов нефти является энергетическим ресурсом будущего. При этом добыча и транспортировка таких нефтей требует применения специальных технологий извлечения и перекачки. В последние годы все более широкое распространение получает ультразвуковое воздействие на нефть с целью улучшения ее реологических характеристик. Однако известно, что интенсивность влияния ультразвука на свойства нефти значимо зависит от ее типа и состава. В настоящей статье с использованием ультразвуковой обработки высоковязкой нефти исследуются закономерности изменения ее вязкости при различном содержании парафина (по массе от 0 до 1,5 %). Для получения температурных зависимостей вязкости применялся вибрационный вискозиметр, для измерения вязкости в условиях постоянной температуры, но на различных скоростях сдвига – реометр. Установлено, что после ультразвуковой обработки вязкость нефти, не содержащей парафин, снизилась на 20 %. При растворении парафина наблюдался отрицательный эффект воздействия ультразвука: вязкость образцов нефти увеличилась. По температурным зависимостям вязкости рассчитаны коэффициенты, зависящие от энергии активации вязкого течения. Ультразвуковое воздействие приводит к увеличению этой энергии – и тем сильнее, чем больше концентрация парафина в нефти. Хромато-масс-спектрометрическое исследование химического состава показало, что содержание легких компонентов нефти после ультразвукового облучения возрастает, что говорит о наличии кавитационного, механического и теплового механизма ультразвукового воздействия. Полученные результаты могут быть использованы при выборе режима ультразвукового воздействия на высоковязкие нефти как при добыче, так и ее транспортировке.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, тяжелая нефть, парафинистая нефть, ультразвуковая обработка нефти, вязкость нефти, реологические свойства нефти

Сведения о финансировании

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01174.

Для цитирования

Влияние ультразвуковой обработки на реологические свойства парафинистой нефти / Е. А. Марфин [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2024. Т. 14. № 1. С. ???–???. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-1-???-???>



Effect of ultrasonic treatment on rheological properties of paraffinic oil

Eugeny A. Marfin^{a,b}, Aliya R. Galimzyanova^a, Rustem N. Gataullin^a, Ruslan A. Natfullin^{a,b}

^a Institute of Power Engineering and Advanced Technologies of Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (Institute of Power Engineering and Advanced Technologies of FRC KazSC of RAS), 2/31 Lobachevsky Str., Kazan, 420111, Russian Federation

^b Physics Institute of Kazan Federal University, 18 Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

Abstract

The depletion of conventional oil reserves and the growing global demand for energy have made heavy, high-viscosity oil a potential energy resource for the future. However, the production and transportation of such oils require special extraction and pumping technologies. The use of ultrasonic technology to improve the rheological characteristics of oil has become increasingly widespread in recent years. The influence of ultrasound on oil properties is known to depend significantly on its type and composition. This paper confidently investigates the patterns of change in viscosity of high-viscosity oil under ultrasonic treatment at different paraffin contents (by weight from 0 to 1.5 %). Temperature dependences of viscosity were obtained using a vibrating viscometer, and viscosity at different shear rates was measured using a rheometer at constant temperature. Ultrasonic treatment was found to reduce the viscosity of paraffin-free oil by 20 %. However, in the presence of paraffin dissolution, the ultrasound had a negative impact, causing an increase in oil viscosity. The coefficients, calculated from the temperature dependences of viscosity and dependent on the activation energy of viscous flow, were determined. Ultrasonic treatment was observed to increase this energy, with a more pronounced effect at higher concentrations of paraffin in the oil. Chromato-mass spectrometry was used to analyze the chemical composition of oil. The results clearly demonstrated that ultrasonic irradiation increases the content of light components of oil, indicating the presence of cavitation, mechanical, and thermal mechanisms of ultrasonic action. These findings are highly valuable in selecting the appropriate mode of ultrasonic exposure for high-viscosity oil in both production and transportation.

Keywords: high-viscosity oil, heavy oil, paraffinic oil, ultrasonic oil treatment, oil viscosity, rheological properties of oil

Acknowledgments

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant 22-29-01174.

For citation

Marfin E. A., Galimzyanova A. R., Gataullin R. N., Natfullin R. A. Effect of ultrasonic treatment on rheological properties of paraffinic oil. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2024;14(1):352–363. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-1-352-363>

Введение

Множество факторов, таких как развитие промышленности, рост численности населения, как следствие, увеличивающийся спрос на топливо, влияют на то, что системы энергоснабжения многих стран мира становятся все более сложными. С сокращением запасов традиционной нефти возрастает значение альтернативных источников углеводородов – тяжелой и высоковязкой нефти [1], являющейся сегодня важнейшей составляющей сырьевой базы нефтяной отрасли нефтедобывающих стран, в том числе России. Однако в отличие от легкой нефти, нетрадиционная нефть требует применения нетривиальных методов добычи и транспортировки [2, 3]. Высокая вязкость и большое содержание асфальто-смолистых и парафиновых компонентов в тяжелой нефти приводят к формированию отложений асфальтенов и парафинов в поровом пространстве горных пород [4–6]. Такие отложения снижают

проницаемость породы и, следовательно, дебит и конечную нефтеотдачу [7, 8]. При охлаждении ниже температуры застывания тяжелая нефть становится гелеобразной, что создает серьезные проблемы при ее транспортировке [9–12]. Асфальто-смоло-парафиновые отложения, образующиеся на внутренней поверхности трубопроводов, уменьшают эффективный диаметр потока и в конечном итоге могут приводить к полному перекрытию труб и кольцевых каналов в затрубном пространстве [13].

Для транспортировки тяжелой нефти с вязкостью от 200 до 400 мПа·с по трубопроводам применяют различные методы [14, 15]. Например, разбавление более легкими нефтяными или органическими растворителями, формирование эмульсий тяжелой нефти в воде, подогрев тяжелой нефти и трубопроводов, использование депрессантов температуры застывания, применение присадок для снижения гидравлического сопротивления и т. д. [16–20].

Распространенный способ снижения парафинообразования при добыче и транспортировке высокопарафинистых нефтей – использование в малых дозах ингибиторов парафинов [21], которые непосредственно нарушают кристаллизацию парафина и снижают температуру выпадения отложений и вязкость нефти.

Одним из примеров таких реагентов являются графт-сополимеры, доказавшие свою эффективность для тяжелой нефти [14]. Взаимодействуя с парафинами в нефти путем нуклеации, адсорбции и совместной кристаллизации, эти присадки прерывают рост кристаллов, изменяют морфологию, тем самым повышают растворимость парафинов. Результаты исследований активности процесса образования парафиновых отложений в условиях применения ингибиторов представлены во многих работах, в том числе [5, 7, 15, 22].

Еще одна группа методов, используемых для снижения интенсивности парафиноотложения, основана на воздействии на поток физическими полями (магнитными, звуковыми и т. д.) [23, 24]. В частности, в последние годы применение ультразвука для повышения нефтеотдачи пластов получает все более широкое применение в нефтяной отрасли [25–27]. Исследователями отмечаются преимущества использования упругих волн для добычи высоковязкой и тяжелой нефти в сравнении с традиционными методами: возможность осуществления воздействия на коллектор и нефть без остановки добычи, снижение энергопотребления, высокий коэффициент безопасности, отсутствие необходимости закачки в пласт специальных веществ, низкий уровень загрязнения окружающей среды [27–29]. При этом необходимо учитывать, что интенсивность влияния ультразвука на свойства нефти существенно зависит от типа нефти и ее состава [30, 31].

Авторами [32–37] указывается на снижение вязкости нефти при ультразвуковой обработке в случае высокого содержания в ней асфальто-смолистых веществ. В отношении содержания парафина эффективность воздействия ультразвука неоднозначна, и этот вопрос требует более глубокого изучения. Есть данные [31], что ультразвуковая обработка высокопарафинистой нефти приводит к ухудшению ее реологии. Известно, что частицы парафина в составе нефти образуют пространственную решетку, и с понижением температуры устойчивость этих решеток возрастает [22]. Высокое содержание высокомолекулярных парафиновых углеводородов в нефти ухудшает ее качественные характеристики, усложняет процессы добычи и транспортировки [10, 15]. Данные по составу нефти свидетельствуют, что высокомолекулярные парафиновые углеводороды содержатся во всех нефтях, при этом их концентрация колеблется в широких пределах [9]. В связи с этим изучение влияния кристаллизующихся парафинов и воздействия ультразвука

на свойства нефти является актуальной задачей. Целью настоящей работы является исследование влияния ультразвукового воздействия на высоковязкую нефть с различным содержанием парафина.

Методы

Образцы нефти

Основным объектом исследования являлась высоковязкая нефть – смесь сырой обезвоженной нефти Актанышского месторождения и битума в соотношении 70/30 по массе. Такая нефть при температуре 20 °С характеризуется плотностью 909 кг/м³ и вязкостью 246,9 мПа·с. Из исследуемой нефти были изготовлены несколько образцов с различным процентным содержанием дополнительно растворенного в ней при нормальных условиях кристаллического парафина (по массе от 0 до 1,5 %). Плотность парафина при 20 °С составляла 897 кг/м³.

Оборудование

Для определения количества нефти и растворяемых компонентов весовым методом использовались электронные лабораторные весы «Масса-К» с точностью измерений ±0,01 г. Образцы нефти помещались в химические стаканы и нагревались на водяной бане с термостатом. Для осуществления ультразвукового воздействия на исследуемые образцы применялся ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна» (модель УЗТА-0.4/22-ОМ), состоящий из генератора и преобразователя.

Реометр Physica MCR 302 (Anton Paar) использовался для измерения вязкости нефти при различных скоростях сдвига и фиксированной температуре. Для определения вязкости нефти при изменении температуры применялся вибрационный вискозиметр SV-10 (A&D). Точность измерения температуры образца жидкости составляет ±0,1 °С, погрешность измерения вязкости – 3 %.

Групповой состав нефти определялся методом SARA-анализа в соответствии со стандартом ASTM. Для хромато-масс-спектрометрического исследования состава образцов нефти использовали квадрупольный хромато-масс-спектрометр Agilent 6890N/5973 (Agilent).

Методика эксперимента

Общая схема исследования представлена на **рис. 1**. Нагретые на водяной бане до 90 °С нефть и парафин смешивались в заданных пропорциях в одной емкости до полного растворения. Поскольку нефть подвергалась различным видам исследования, было приготовлено несколько экземпляров каждого образца нефти с различным содержанием парафина, каждый из которых помещали в отдельный химический стакан объемом 75 мл.



Рис. 1. Схема проведения эксперимента
Fig. 1. Scheme of experimental procedure

Обработка образцов нефти ультразвуком осуществлялась на частоте 22 кГц. Интенсивность воздействия задавалась на уровне 70 % от максимальной и составляла примерно 15 Вт/см². Начальная температура образцов принималась одинаковой и равнялась 25 °С. Ультразвуковое воздействие на каждый образец выполнялось в течение двух минут, при этом масса обработанного образца была 50 г. Таким образом, удельная интенсивность ультразвукового воздействия составила 0,3 кВт/(см²·кг).

Реологические кривые образцов нефти были получены на реометре при скорости сдвига от 1 до 500 с⁻¹ и фиксированных значениях температуры, поддерживаемых с точностью ±0,1 °С. Температурные зависимости вязкости нефти до и после ультразвуковой обработки определялись на вибрационном вискозиметре: для этого нагретый образец апомещался в измерительную емкость и при медленном охлаждении с шагом 5 секунд измерялась его вязкость и температура.

Образцы нефти методом SARA-анализа разделяли на четыре фракции: насыщенные углеводороды, ароматические соединения, смолы, асфальтены (в процентах по массе). Асфальтены осаждались при растворении н-гексана, массовое соотношение нефти к растворителю составляло 1:40. Оставшиеся компоненты (мальтены) разделяли методом жидкостной адсорбционной хроматографии на оксиде алюминия, прокаленном при 420 °С в течение трех часов. Насыщенные продукты элюировали с сорбентом н-гексаном, ароматические – толуолом, смолы – смесью толуола и метанола, взятых в соотношении 3:1.

Полученные фракции образцов нефти исследовали методом хромато-масс-спектрометрии. Применялась электронная ионизация. Ионизи-

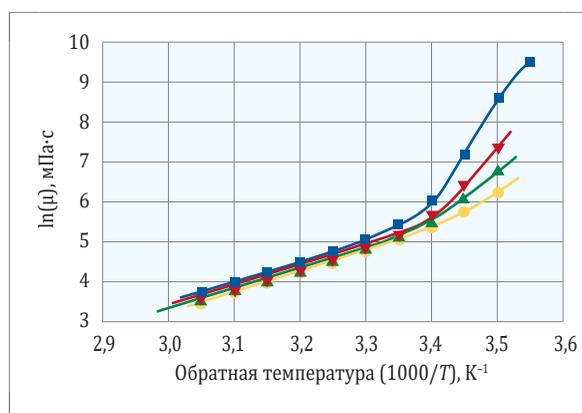


Рис. 2. Температурные зависимости вязкости образцов нефти с различным содержанием парафина:
— без парафина; — 0,5 %; — 1 %; — 1,5 %
Fig. 2. Temperature dependences of oil viscosity samples with different paraffin content:
— without paraffin; — 0,5 %; — 1,0 %; — 1,5 %

рующие электроны имели энергию 70 эВ, а источник ионов – температуру 230 °С. Использовалась капиллярная колонка HP-5MS длиной 30 м и диаметром 0,25 мм.

Результаты

При понижении температуры вязкость образцов нефти ожидаемо увеличивалась. На рис. 2 представлены кривые зависимости логарифма вязкости от обратной температуры. Если для легких нефтей такие зависимости, как правило, имеют вид прямой линии, то для исследуемых высоковязких парафиносодержащих образцов нефти, как видно, характерны кривые «клюшкообразной» формы.



Ультразвуковое воздействие на нефть приводит в первую очередь к ее нагреву вследствие поглощения ультразвука. Так, 50 г нефти за две минуты обработки нагрелись примерно на 35,5 °С. При этом реологические свойства нефти под воздействием ультразвука изменялись следующим образом. Вязкость исходной нефти снизилась на 20 %. Однако добавление парафина дало обратный эффект: вязкость парафиносодержащих образцов увеличилась. На **рис. 3** представлены зависимости относительной вязкости нефти от температуры после ультразвуковой обработки исследуемых образцов. Видно, что во всем температурном диапазоне вязкость обработанной парафиносодержащей нефти выше, чем необработанной. Похожий результат был отмечен в работе [30]. Наибольшая вязкость (двукратное увеличение относительного показателя исходной нефти) наблюдалась у образца с 1-процентным содержанием парафина при температуре 15 °С.

Исследования образцов нефти на реометре позволили получить их реологические кривые. На **рис. 4** представлены зависимости вязкости от

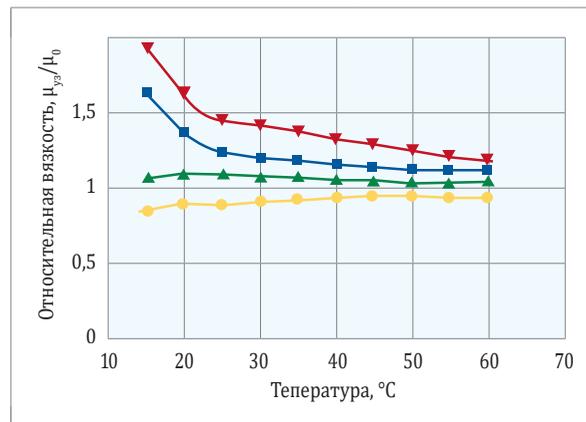


Рис. 3. Зависимости относительной вязкости от температуры после ультразвуковой обработки образцов нефти с различным содержанием парафина:

● - без парафина; ▲ - 0,5 %; ▼ - 1 %; ■ - 1,5 %

Fig. 3. Dependences of relative viscosity on temperature after ultrasonic treatment of oil samples with different paraffin content: ● - without paraffin; ▲ - 0,5 %; ▼ - 1 %; ■ - 1,5 %

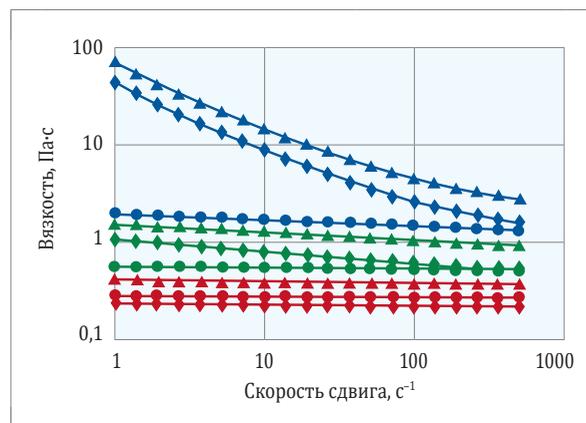


Рис. 4. Зависимости вязкости образцов нефти от скорости сдвига: ● - без парафина, 10 °С; ● - без парафина, 20 °С; ● - без парафина, 30 °С; ● - 1,5 % парафина, 10 °С; ● - 1,5 % парафина, 20 °С; ● - 1,5 % парафина, 30 °С; ▲ - 1,5 % парафина, УЗ-обработка, 10 °С; ▲ - 1,5 % парафина, УЗ-обработка, 20 °С; ▲ - 1,5 % парафина, УЗ-обработка, 30 °С

Fig. 4. Dependences of viscosity of oil samples on shear rate: ● - without paraffin, 10 °С; ● - without paraffin, 20 °С; ● - without paraffin, 30 °С; ● - 1,5 % paraffin, 10 °С; ● - 1,5 % paraffin, 20 °С; ● - 1,5 % paraffin, 30 °С; ▲ - 1,5 % paraffin, US treatment, 10 °С; ▲ - 1,5 % paraffin, US treatment, 20 °С; ▲ - 1,5 % paraffin, US treatment, 30 °С

скорости сдвига при трех различных значениях температуры (10, 20, 30 °С) для исходной нефти, нефти с 1,5-процентным содержанием парафина, а также для парафинистой нефти (1,5 %) после ультразвуковой обработки в течение двух минут. Исходная нефть при высоких температурах проявляет ньютоновские свойства: ее вязкость не зависит от скорости сдвига. При температуре 10 °С для данных образцов отмечается проявление неньютоновских свойств. Добавление 1,5 % парафина при температуре 30 °С снижает вязкость нефти, но уже при 20 °С значения вязкости по-

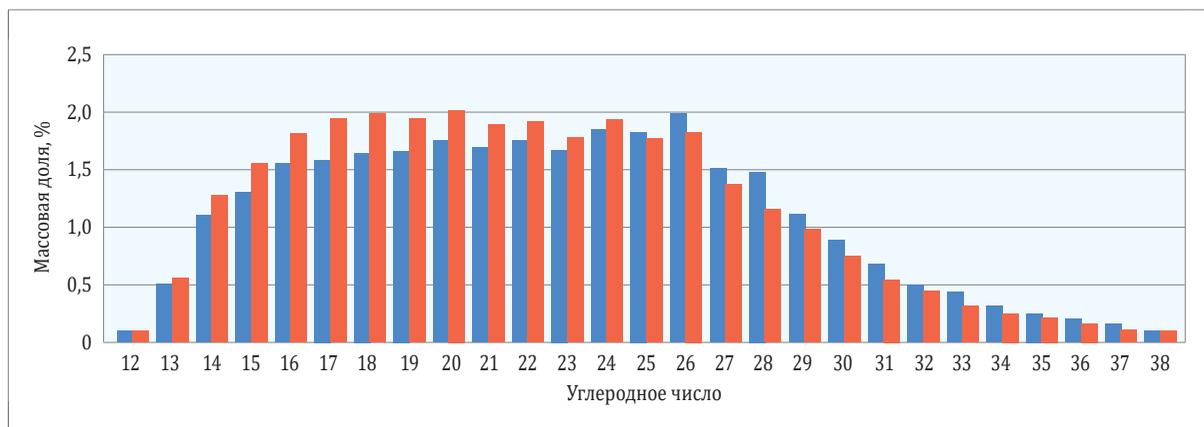


Рис. 5. Молекулярно-массовое распределение n-алканов в образцах нефти до (■) и после (■) ультразвукового воздействия
Fig. 5. Molecular weight distribution of n-alkanes in oil samples before (■) and after (■) ultrasonic treatment

вышаются, отмечается проявление неньютоновских свойств, а охлаждение до 10 °С существенно увеличивает вязкость и усиливает проявление неньютоновских свойств. Ультразвуковая обработка парафинистых образцов привела к повышению вязкости по сравнению с показателями необработанной нефти. Также замечено, что у образца, подвергнутого воздействию ультразвука, сильнее проявляются неньютоновские свойства.

Исследование состава нефти до и после выполнения ультразвуковой обработки выявило определенные изменения. Так, по результатам SARA-анализа образца с содержанием парафина 1,5 % установлено, что в его составе до воздействия ультразвука было 35,7 % насыщенных углеводородов, 9,09 % ароматических соединений, 47,82 % смол и 7,39 % асфальтенов. После обработки состав изменился: 36,49 % насыщенных углеводородов, 6,01 % ароматических соединений, 50 % смол и 7,51 % асфальтенов.

На рис. 5 показаны изменения, произошедшие после обработки ультразвуком для отдельной группы насыщенных углеводородов. Анализ полученных данных показывает, что воздействие ультразвука приводит к изменению молекулярного состава нефти. Доля тяжелых молекул снижается, а легких – возрастает. Коэффициент $K = n-(C11-C17)/n-(C18-C38)$, определяющий соотношение парафиновых углеводородов нормального строения, свидетельствует о том, что доля низкомолекулярных гомологов после ультразвукового воздействия возрастает на 17% (с 0,263 до 0,308).

Обсуждение

Анализ экспериментальных данных в виде зависимости логарифма вязкости от обратной температуры позволяет получить значение энергии активации вязкого течения. Для большинства жидкостей такая зависимость является прямой и может быть описана уравнением Арениуса – Френкеля:

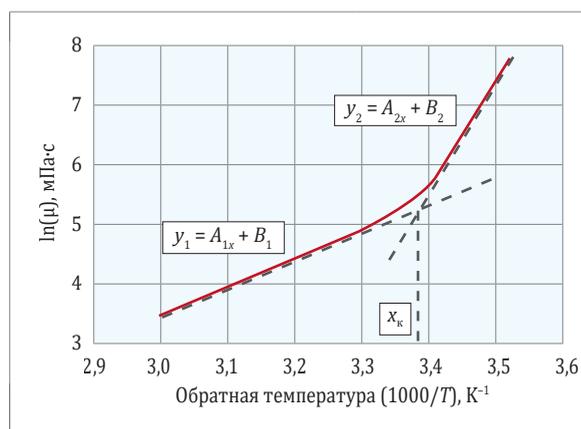


Рис. 6. Графическое представление алгоритма обработки экспериментальных данных
Fig. 6. Graphical representation of the algorithm for experimental data processing

$$\mu = Ae^{\left(\frac{W}{RT}\right)},$$

где A – предэкспоненциальный коэффициент, мПа·с;

W – энергия активации вязкого течения, Дж/моль;

$R = 8,31446262$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура, К.

По полученным значениям вязкости и температуры нефти строится график, отражающий зависимость логарифма вязкости от обратной температуры. Графические зависимости аппроксимируются линейной функцией, из ее коэффициентов определяются значения W и A . Однако в связи с тем, что в рассматриваемом случае парафинсодержащая нефть начинает застывать при комнатных температурах, кривая зависимости логарифма вязкости от температуры для нее имеет «клюшкообразную» форму и соответственно два прямолинейных участка (рис. 6). Для каждого прямолинейного участка определяются свои коэффициенты.

Таблица. Показатели температурных зависимостей вязкости образцов нефти
Table. Indicators of temperature dependences of oil samples viscosity

Образец нефти	Содержание парафина, %	Коэффициенты аппроксимации				$T_{кр}$, °C
		A_1	B_1	A_2	B_2	
1	0	4,846	-11,22	11,682	-34,65	18,65
	0 (после УЗ)	4,917	-11,33	11,573	-34,01	20,38
2	0,5	5,188	-12,20	13,620	-40,92	20,43
	0,5 (после УЗ)	5,258	-12,38	14,310	-43,15	21,08
3	1,0	4,796	-10,98	18,183	-56,33	22,06
	1,0 (после УЗ)	5,268	-12,23	19,619	-60,67	23,10
4	1,5	5,054	-11,68	23,857	-75,07	23,46
	1,5 (после УЗ)	5,202	-12,02	27,656	-87,76	23,30

Такие температурные зависимости можно описать, используя функцию Хевисайда, в виде уравнения:

$$\mu = \exp\{A_1x + B_1 + [(A_2 - A_1)x + (B_2 - B_1)] \times Q(x - x_k)\}, \quad (1)$$

где A_1, B_1, A_2, B_2 – коэффициенты уравнений, аппроксимирующие прямолинейные участки температурной зависимости вязкости;

$x = 1000/T$, T – абсолютная температура, К;

$Q(x) \approx \frac{1}{1 + e^{-2kx}}$ – функция Хевисайда;

x_k – точка перехода (начала активной кристаллизации парафина);

k – коэффициент, определяемый методом наименьших квадратов.

Обработка полученных температурных зависимостей позволила определить коэффициенты, входящие в уравнение (1) – см. таблицу. Как видно, после ультразвукового воздействия на образцы нефти значения коэффициентов меняются. Так, коэффициенты A_1 и A_2 , характеризующие энергию активации вязкого течения в высокотемпературной и низкотемпературной областях, после ультразвуковой обработки увеличились на 1,4–2,9 и 5–15,9 % соответственно. Значения коэффициентов B_1 и B_2 имеют примерно такую же тенденцию к повышению. Из таблицы также видно, что значение температуры, при которой начинается активный процесс «кристаллизации» парафина ($T_{кр}$), тоже увеличивается.

Проведенные эксперименты показали, что после ультразвукового воздействия вязкость нефти с высоким содержанием асфальто-смолистых компонентов снижается. Такое поведение характерно для многих высоковязких нефтей, что подтверждается большим количеством исследований, в том числе [1, 30, 34, 36]. Практически не меняя состав асфальто-смолистых компонентов нефти, лишь добавляя в нее малое количество твердого парафина (до 1,5 %), мы получили образцы нефти, которые очень чувствительны к воздействию ультразвука. Так, после обработки в

течение двух минут показатели вязкости исследуемой нефти значительно увеличились, максимально – у образца с 1-процентным содержанием парафина. Аналогичные закономерности демонстрируют многие парафиносодержащие нефти, что отмечается в исследованиях [30, 32]. Например, в [30] показано, что с увеличением длительности воздействия ультразвука (до десяти минут) отрицательный эффект обработки только увеличивается.

Изменение состава нефти в части предельных углеводородов свидетельствует о том, что доля высокомолекулярных соединений уменьшается. Это должно приводить к снижению вязкости вследствие увеличения количества низкомолекулярных соединений, но результаты эксперимента противоречат этому выводу. Наиболее вероятной причиной увеличения вязкости является то, что после ультразвуковой обработки доля смол в нефти увеличилась на 2,18 % за счет снижения доли ароматических соединений. Главным механизмом воздействия ультразвука рассматривают кавитационный эффект [22, 31, 37]. Другим фактором, объясняющим явление повышения вязкости парафиносодержащей нефти после ультразвуковой обработки, является то, что в поле упругих колебаний твердые кристаллы парафина растворяются в углеводородах нефти [38].

Обобщая полученные экспериментальные данные, можно заключить, что если высоковязкая нефть содержит парафин и проявляет не-newтоновские свойства, то ее вязкость после непродолжительной ультразвуковой обработки увеличится. Соответственно, данный способ воздействия на реологические свойства нефти не рекомендуется применять для снижения вязкости тяжелых нефтей. Однако полученные данные позволяют сформулировать новые направления исследований в данной области. Например, изучение того, как парафин способствует ультразвуковому разрушению ароматических углеводородов и образованию новых смол, или изучение процесса растворения парафина под действием ультразвука. Данные исследования важны как с

точки зрения повышения эффективности трубопроводного транспорта высоковязких нефтей, так и борьбы с асфальто-смолистыми и парафиновыми отложениями.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показали, что после ультразвуковой обработки образцов высоковязкой нефти на частоте 22 кГц с удельной интенсивностью 0,3 кВт/(см²·кг) в течение двух минут вязкость нефти снизилась на 20 %. При этом установлено, что эффективность ультразвуковой обработки принципиально зависит от содержания в нефти парафина. Так, растворение незначительного количества парафина (до 1,5 % по массе) привело к обратному эффекту при воздействии ультразвука на исследуемые образцы: вязкость нефти значительно увеличилась (до двух раз по сравнению исходной нефтью).

Полученные данные свидетельствуют о повышении вязкости нефти после ультразвукового воздействия во всем исследуемом температурном диапазоне с явной тенденцией увеличения относительной вязкости при снижении температуры. Предложено уравнение, описывающее сложный вид температурной зависимости вязкости, и определены коэффициенты для каждого исследуемого образца нефти. Результаты экспериментов демонстрируют новые направления исследований в области применения ультразвука для воздействия на реологические свойства нефти, а также позволяют оценить перспективы и возможности оптимизации режима акустического воздействия на продуктивный пласт для интенсификации добычи и транспортировки тяжелых нефтей.

Список литературы

- [1] Гатауллин Р. Н. Состояние разработки месторождений тяжелой нефти и природных битумов // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 10. С. 71–82.
- [2] Муллакаев М. С., Муллакаев Р. М., Волкова Г. И. Транспортировка высоковязкой нефти // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. № 12. С. 64–70.
- [3] Hart A. A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2014. Vol. 4. P. 327–336.
- [4] Осложнения при добыче парафинистой нефти в условиях выноса механических примесей / И. Г. Хамитов [и др.] // Нефтепромысловое дело. 2017. № 1. С. 36–40.
- [5] Ляпин А. Ю., Астахов А. В., Михалев Ю. П. Исследование температуры кристаллизации парафинов в нефти с целью уменьшения образования асфальтосмолопарафиновых отложений // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7. № 6. С. 28–35.
- [6] Юдина Н. В., Лоскутова Ю. В., Бешагина Е. В. Состав и реологические свойства асфальтосмолопарафиновых отложений // Нефтяное хозяйство. 2012. № 2. С. 69–71.
- [7] Акрамов Т. Ф., Яркиева Н. Р. Борьба с отложениями парафиновых, асфальтосмолистых компонентов нефти // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 4. С. 67–72.
- [8] Souas F., Safri A., Benmounah A. A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation // Petroleum Research. 2021. Vol. 6. Is. 2. P. 116–136.
- [9] Яценко И. Г. Физико-химические и реологические свойства вязких парафинистых нефтей // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. Т. 31. № 2. С. 243–254.
- [10] Исследование физико-химических и реологических свойств нефтесмесей, транспортируемых по нефтепроводу Узень – Атырау – Самара / Б. К. Саяхов [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Т. 11. № 4. С. 420–427.
- [11] Федоров П. В., Лукманов М. Р. Влияние реологических свойств нефти на энергоэффективность работы нефтепровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 1. С. 8–16.
- [12] Ramírez-Gonzalez P. V., Quineones-Cisneros S. Rheological behavior of heavy and extra-heavy crude oils at high pressure // Energy Fuels. 2020. Vol. 34. Is. 2. P. 1268–1275.
- [13] Липаев А. А., Трофимов Д. Е. Методы депарафинизации нефтяных скважин // Управление техносферой. 2018. Т. 1. № 4. С. 372–386.
- [14] Пути улучшения низкотемпературных показателей транспортируемой парафинистой нефти / Г. В. Власова [и др.] // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2017. № 12(72). С. 48–50.
- [15] Байдельдина О. Ж., Дарибаева Н. Г., Нуранбаева Б. М. Особенности строения и свойств парафинистых нефтей Казахстана, влияющие на эффективность мероприятий при борьбе с парафиноотложениями // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 4. С. 100–106.
- [16] Критерии эффективности физического воздействия на нефть со сложными реологическими характеристиками / М. А. Промтов [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Т. 12. № 2. С. 128–137.
- [17] Исследование причин снижения эффективности депрессорной присадки при перекачке парафинистых нефтей / А. Ю. Ляпин [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 2. С. 157–163.
- [18] Применение противотурбулентных присадок на «горячих» нефтепроводах / В. В. Жолобов [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Т. 8. № 5. С. 496–509.
- [19] Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Стасьева Л. А. Температурные зависимости реологических свойств систем «вязкая парафинистая нефть – водная фаза – ПАВ» // Нефтехимия. 2020. Т. 60. № 3. С. 369–376.
- [20] Effect of ultrasound radiation duration on emulsification and demulsification of paraffin oil and surfactant solution/brine using Hele-shaw models / H. Hamidi [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2015. Vol. 26. P. 428–436.
- [21] Дубовой Е. С., Хафизов Н. Н., Кузнецов А. А. Подход к оценке эффективности ингибиторов парафиноотложения // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 4. С. 402–407.
- [22] Zhou L., Wang Z. A comparison study on the removal of paraffin wax deposition plug by ultrasound treatment, chemical demulsifier and combination of ultrasound and chemical demulsifier // Petroleum Science and Technology. 2020. Vol. 38. Is. 9. P. 690–697.
- [23] Оценка эффективности метода гидродинамической импульсной обработки для улучшения реологии смеси нефтей Южно-Лыжского и Кыртаельского месторождений / М. А. Промтов [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Т. 13. № 3. С. 225–231.
- [24] Tao R., Tang H. Reducing viscosity of paraffin base crude oil with electric field for oil production and transportation // Fuel. 2014. Vol. 118. P. 69–72.

- [25] Mullakaev M. S. Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water. M.: HELRI, 2018. 376 p.
- [26] Sonochemical approaches to enhanced oil recovery / V. O. Abramov [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015. Vol. 25. P. 76–81.
- [27] Wang Z., Yin C. Reprint of: State-of-the-art on ultrasonic oil production technique for EOR in China // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 40. Part B. P. 201–207.
- [28] Гатауллин Р. Н., Галимзянова А. Р., Марфин Е. А. Влияние акустического воздействия на проницаемость пористых сред (обзор) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 10. С. 186–202.
- [29] Marfin E. A., Gataullin R. N., Abdrashitov A. A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 215. P. 110705.
- [30] Mullakaev M. S., Volkova G. I., Gradov O. M. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2015. Vol. 49. No. 3. P. 287–296.
- [31] Volkova G. I., Anufriev R. V., Yudina N. V. Effect of ultrasonic treatment on the composition and properties of waxy high-resin oil // *Petroleum Chemistry*. 2016. Vol. 56. No. 8. P. 683–689.
- [32] Ануфриев Р. В., Волкова Г. И., Юдина Н. В. Влияние состава дисперсионной среды на свойства высокопарафинистых дисперсных систем, обработанных ультразвуком // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 4. С. 45–53.
- [33] Бойцова А. А., Кондрашева Н. К., Крапивский Е. И. Влияние ультразвукового воздействия на физико-химические свойства смеси разнородных нефтей нафтен-ароматической и парафинистой оснований с целью улучшения качества их переработки // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. № S1-4. С. 276–281.
- [34] Viscosity reduction of heavy oil by ultrasonic / Shiyi Lv [et al.] // *Petroleum Chemistry*. 2020. Vol. 60. No. 9. P. 998–1002.
- [35] Кадыйров А. И., Караева Ю. В., Вачагина Е. К. Динамика изменения реологических свойств нефти после ультразвуковой обработки // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2020. № 6. С. 30–34.
- [36] Experimental study on viscosity reduction for residual oil by ultrasonic / X. Huang [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 41. P. 661–669.
- [37] Fasfiev B. R., Khusnullina A. A., Marfin E. A. The change in the temperature dependence of the viscosity of oil under ultrasonic action // *Geomodel 2018 – 20th Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. Gelendzhik : EAGE, 2018. P. 201802359.
- [38] Innovations in oil processing: chemical transformation of oil components through ultrasound assistance / A. V. Dengaev [et al.] // *Fluids*. 2023. Vol. 8. P. 108.
- [5] Lyapin A. Y., Astakhov A. V., Mikhalyov Yu. P. Study of the wax crystallization temperature in oil in order to reduce the formation of asphalt-resin-paraffin deposits. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017;7(6):28–35. (In Russ.)
- [6] Yudina N. V., Loskutova Yu. V., Beshagina E. V. Composition and rheological properties of oil deposits of highly paraffinic crude oil. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*. 2012(2):69–71. (In Russ.)
- [7] Akramov T. F., Iarkeeva N. R. Control deposits of paraffin, asphalt-resin components of oil. *Petroleum Engineering*. 2017;15(4):67–72. (In Russ.)
- [8] Souas F., Safri A., Benmounah A. A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation. *Petroleum Research*. 2021;6(2):116–136.
- [9] Yashchenko I. G. Physicochemical and rheological properties of viscous paraffin oils. *Chemistry for Sustainable Development*. 2023;31(2):243–254. (In Russ.)
- [10] Sayakhov B. K., Didukh A. G., Gabsattarova G. A., Nasibullin M. D., Nauruzbekov Z. K. Study of the physical, chemical and rheological properties of oil mixtures transported through the Uzen – Atyrau – Samara pipeline. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2021;11(4):420–427. (In Russ.)
- [11] Fedorov P. V., Lukmanov M. R. Impact of rheological properties of oil on pipeline operation energy efficiency. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2020;10(1):8–16. (In Russ.)
- [12] Ramirez-Gonzalez P. V., Quineones-Cisneros S. Rheological behavior of heavy and extra-heavy crude oils at high pressure. *Energy Fuels*. 2020;34(2):1268–1275.
- [13] Lipaev A. A., Trofimov D. E. Methods of deparaffination of oil wells. *Management of Technosphere*. 2018;1(4):372–386. (In Russ.)
- [14] Vlasova G. V., Pivovarova N. A., Kulikova E. D., Khafizullina N. R. Ways to improve low-temperature characteristics of transported paraffinic oil. *Business Magazine Neftegaz.ru*. 2017;12(72):48–50. (In Russ.)
- [15] Baideldina O. Z., Daribaeva N. G., Nuranbaeva B. M. Features of the structure and properties of crude oils of Kazakhstan influencing the effectiveness of interventions in the fight against paraffination. *Modern High-end Technologies*. 2015;4:100–106. (In Russ.)
- [16] Promtov M. A., Sunagatullin R. Z., Kutukov S. E., Koliukh A. N., Sheina O. A., Zverev F. S. Effectiveness criteria for physical actions on oil with complicated rheological characteristics. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2022;12(2):128–137. (In Russ.)
- [17] Lyapin A. Y., Nekuchaev V. O., Ovchinnikov S. K., Mikheev M. M. Investigation of the reasons for decreased efficiency of depressant additives during the pumping of paraffinic oils. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2020;10(2):157–163. (In Russ.)
- [18] Zholobov V. V., Nesyn G. V., Zverev F. S., Khasbiullin I. I., Valiev M. I. Application of drag reducing agents in “hot” oil pipelines. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2018;8(5):496–509. (In Russ.)
- [19] Altunina L. K., Kuvshinov V. A., Stas’eva L. A. Temperature dependences of the rheological properties of “viscous paraffin oil – aqueous phase – surfactant” systems. *Petroleum Chemistry*. 2020;60(3):369–376. (In Russ.)
- [20] Hamidi H., Mohammadian E., Asadullah M., Azdarpour A., Rafati R. Effect of ultrasound radiation duration on emulsification and demulsification of paraffin oil and surfactant solution/brine using Hele-shaw models. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015;26:428–436.

References

- [1] Gataullin R. N. The state of heavy oil and natural bitumens fields development. *Bulletin of the Technological University*. 2018;21(10):71–82. (In Russ.)
- [2] Mullakaev M. S., Mullakaev R. M., Volkova G. I. Transportation of high-viscosity oil. *Business Magazine Neftegaz.ru*. 2020(12):64–70. (In Russ.)
- [3] Hart A. A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2014;4:327–336.
- [4] Hamitov I. G., Petrov N. A., Struchkov I. A., Roschin P. V., Manasian A. E., Pavlov P. V. Problems that arise during paraffin oil production in conditions of mechanical impurities evacuation. *Oilfield Engineering*. 2017;1:36–40. (In Russ.)

- [21] Dubovoy E. S., Khafizov N. N., Kuznetsov A. A. An approach to assessing the performance of paraffin inhibitors. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2019;9(4):402–407. (In Russ.)
- [22] Zhou L., Wang Z. A comparison study on the removal of paraffin wax deposition plug by ultrasound treatment, chemical demulsifier and combination of ultrasound and chemical demulsifier. *Petroleum Science and Technology*. 2020;38(9):690–697.
- [23] Promtov M. A., Kutukov S. E., Koliukh A. N., Zverev F. S. Assessment of hydrodynamic pulse treatment method performance in improvement of rheology of oil blend from Yuzhno-Lyzhskoye and Kyrtalskoye fields. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2023;13(3):225–231. (In Russ.)
- [24] Tao R., Tang H. Reducing viscosity of paraffin base crude oil with electric field for oil production and transportation. *Fuel*. 2014;118:69–72.
- [25] Mullakaev M. S. Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water. M.: HELRI Publ.; 2018. 376 p.
- [26] Abramov V. O., Abramova A. V., Bayazitov V. M., Altunina L. K., Gerasin A. S., Pashin D. M., Mason T. J. Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015;25:76–81.
- [27] Wang Z., Yin C. Reprint of: State-of-the-art on ultrasonic oil production technique for EOR in China. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;40,Part B:201–207.
- [28] Gataullin R. N., Galimzyanova A. R., Marfin E. A. Acoustic influence effect on porous media permeability (review). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(10):186–202. (In Russ.)
- [29] Marfin E. A., Gataullin R. N., Abdrashitov A. A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022;215:110705.
- [30] Mullakaev M. S., Volkova G. I., Gradov O. M. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2015;49(3):287–296.
- [31] Volkova G. I., Anufriev R. V., Yudina N. V. Effect of ultrasonic treatment on the composition and properties of waxy high-resin oil. *Petroleum Chemistry*. 2016;56(8):683–689.
- [32] Anufriev R. V., Volkova G. I., Yudina N. V. Influence of dispersion medium composition on properties of wax disperse systems after sonication. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(4):45–53. (In Russ.)
- [33] Boytsova A. A., Kondrasheva N. K., Krapivsky E. I. Ultrasonic influence on physico-chemical properties of the mixture of dissimilar oil aromatic-naphtha and paraffin base in order to improve the quality of its processing. *Mining Research Bulletin (MRB)*. 2015;S1-4:276–281. (In Russ.)
- [34] Lv S., Peng S., Zhang R., Guo Z., Du W., Zhang J., Chen G. Viscosity reduction of heavy oil by ultrasonic. *Petroleum Chemistry*. 2020;60(9):998–1002.
- [35] Kadyirov A., Karaeva Yu., Vachagina E. Dynamics of crude oil rheological properties after ultrasonic treatment. *Energy Safety and Energy Economy*. 2020(6):30–34. (In Russ.)
- [36] Huang X., Zhou C., Suo Q., Zhang L., Wang S. Experimental study on viscosity reduction for residual oil by ultrasonic. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;41:661–669.
- [37] Fasfiev B. R., Khusnullina A., Marfin E. A. The change in the temperature dependence of the viscosity of oil under ultrasonic action. *Geomodel 2018 – 20th Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. 2015 September 07–10; Gelendzhik. *Gelendzhik. EAGE Publ.*; 2018. P. 201802359.
- [38] Dengaev A. V., Khelkhal M. A., Getalov A. A., Baimukhmetov G. F., Kayumov A. A., Vakhin A. V., Gafurov M. R. Innovations in oil processing: chemical transformation of oil components through ultrasound assistance. *Fluids*. 2023;8:108.

Статья получена редакцией 08.07.2023,
принята к публикации 20.12.2023

Received on July 08, 2023; in final form, December 20, 2023

Сведения об авторах | Authors's credentials



Е. А. Марфин, к. т. н., ведущий научный сотрудник лаборатории теплофизики и волновых технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, доцент кафедры радиоэлектроники Института физики Казанского федерального университета, Казань, Россия

Eugeny A. Marfin, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Laboratory of Thermophysics and Wave Technologies of Institute of Power Engineering and Advanced Technologies of FRC KazSC of RAS, Associate Professor of Department of Radioelectronics of Physics Institute of Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation
marfin_ea@mail.ru



А. Р. Галимзянова, младший научный сотрудник лаборатории теплофизики и волновых технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

Aliya R. Galimzyanova, Junior Researcher of Laboratory of Thermophysics and Wave Technologies of Institute of Power Engineering and Advanced Technologies of FRC KazSC of RAS, Kazan, Russian Federation
galimzyanova_aliy@mail.ru



Р. Н. Гатауллин, к. т. н., старший научный сотрудник лаборатории теплофизики и волновых технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

Rustem N. Gataullin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Thermophysics and Wave Technologies of Institute of Power Engineering and Advanced Technologies of FRC KazSC of RAS, Kazan, Russian Federation
rustem.acadrome@mail.ru



Р. А. Натфуллин, младший научный сотрудник лаборатории теплофизики и волновых технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, магистрант Института физики Казанского федерального университета, Казань, Россия

Ruslan A. Natfullin, Junior Researcher, Laboratory of Thermophysics and Wave Technologies of Institute of Power Engineering and Advanced Technologies of FRC KazSC of RAS, Master's Student of Physics Institute of Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation
nruslan692@gmail.com