

Научная статья

УДК 532.5

doi: 10.17223/19988621/80/11

Экспериментальное изучение влияния ультразвука на движение стеклянных шариков в ячейках Хеле-Шоу

Артур Ашотович Рахимов¹, Азат Ахматович Валиев²

^{1, 2} *Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия*

¹ *ragar83@mail.ru*

² *azatphysic@mail.ru*

Аннотация. Исследовано ультразвуковое воздействие (УЗВ) при заполнении стеклянными шариками ячеек Хеле-Шоу, в том числе с сужением. Расход по воде шариков, просеянных через сито 150 мкм, в ячейке с зазором 200 мкм пропорционально возрастал с увеличением перепада давления (ΔP), а шариков, просеянных через сито 70 мкм, возрастал сильнее с увеличением ΔP . УЗВ привело к плотной упаковке шариков при заполнении ячеек Хеле-Шоу с постоянно действующим ΔP и возобновляло течение при блокировке сужения.

Ключевые слова: ячейка Хеле-Шоу, ультразвуковое воздействие, перепад давления, эффект динамического запираания, стеклянные шарики, сужение

Благодарности: Работа выполнена с использованием средств государственного бюджета по госзаданию на 2019–2022 годы (№ 0246-2019-0052).

Для цитирования: Рахимов А.А., Валиев А.А. Экспериментальное изучение влияния ультразвука на движение стеклянных шариков в ячейках Хеле-Шоу // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 80. С. 117–132. doi: 10.17223/19988621/80/11

Original article

An experimental study of the ultrasound effect on the motion of glass spherules in Hele-Shaw cells

Artur A. Rakhimov¹, Azat A. Valiev²

^{1, 2} *Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa, Russian Federation*

¹ *ragar83@mail.ru*

² *azatphysic@mail.ru*

Abstract. This paper presents the experimental study results for the effect of ultrasound influence (USI) on the filling of the Hele-Shaw cells with glass spherules at a constant pressure drop, including the case with a stepwise constriction. The process considered represents a physical model of fractures in an oil reservoir. The experimental set-up is developed with the use of visualization methods for microfluidic studies. Exposure to the

USI and constant pressure drop provides the close packing and uniform distribution of the spherules. The flow rate of the water with glass spherules, which are sieved through a 150 μm strainer in the measured model with a thickness of 200 μm , increases proportionally with an increase in the pressure drop, while for the model with the spherules sieved through a 70 μm strainer, the increase is more significant, and the flow rate is five times lower for a pressure drop of 50 kPa. The USI is revealed to be crucial for the uniform filling with the spherules, both in the volumetric models with and without constriction. When the spherules block the constriction, the USI reactivates the flow. Thus, it is a reliable method of influencing the dynamic blocking effect, which is promising for creating the technology intended to increase the ratio of hard-to-recover oil reserves in the total production balance.

Keywords: Hele-Shaw cell, ultrasonic influence, pressure drop, dynamic blocking effect, glass spherules, constriction

Acknowledgments: The work is funded by the state budget according to the state assignment for 2019–2022 (No. 0246-2019-0052).

For citation: Rakhimov, A.A., Valiev, A.A. (2022) An experimental study of the ultrasound effect on the motion of glass spherules in Hele-Shaw cells. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 80. pp. 117–132. doi: 10.17223/19988621/80/11

Введение

Опыт разработки нефтяных месторождений свидетельствует, что в процессах первичного и вторичного вскрытия продуктивных пластов, глушения и ремонтных работ в скважинах, а также при их эксплуатации постепенно ухудшаются свойства призабойной зоны пласта. Чаще всего это является следствием отрицательного воздействия технологических жидкостей на водной основе, которые наиболее широко используются на данном этапе развития отрасли. Альтернативными системами в этом плане являются составы на углеводородной основе, в частности обратные эмульсии. Применение растворов на углеводородной основе для щадящего глушения нефтяных скважин, а также в качестве промывочных жидкостей при бурении и вскрытии продуктивных пластов позволяет повысить технико-экономические показатели бурения и ремонта скважин и сохранять естественные свойства продуктивных пластов.

Обратные водонефтяные эмульсии представляют собой микрокапли дисперсной фазы – воды, находящиеся в дисперсионной среде – нефти. Высококонцентрированные обратные водонефтяные эмульсии обладают гидродинамической особенностью – высокой вязкостью, значительно превышающей вязкость несущей фазы, при этом повышение концентрации дисперсной фазы ведет к существенному возрастанию вязкости эмульсии. Экспериментально доказано: структурирование эмульсий в микроканалах, приводящее к изменению реологических свойств, в одних случаях происходит вследствие разрушения, коалесценции дисперсной фазы, в других случаях – из-за диспергации.

Для того чтобы исследовать поведение нелинейных систем в неоднородном поле, важно изучить особенности их преобразования и движения не столько при постоянных скоростях подачи жидкости, сколько при постоянных перепадах давления. При их течении в капиллярах и пористой структуре проявляется эффект

динамического запираания [1, 2], который заключается в том, что течение жидкости, несмотря на постоянно действующий перепад давления, по показаниям прецизионных электронных весов, измеряющих с точностью до 0,1 мг, прекращается. Детальное изучение структуры потока под микроскопом обнаруживает, что на самом деле течение не прекращается полностью, а уменьшается со временем более чем на 3 порядка, поэтому это явление было названо эффектом динамического запираания. Наличие данного эффекта объясняет успех применения водонефтяных эмульсий в потокоотклоняющих технологиях, в качестве жидкостей для глушения скважин и буровых растворов с коагуляционными свойствами.

Еще в конце 60-х гг. XX столетия появилась работа Дж.А. Дэвиса [3], в которой упоминается изготовленная с использованием метода фотолитографии модель для фильтрации многофазных систем, названная микромоделью. В ней для изготовления фотошаблона использовался рисунок маскхалата. Стеклопластинка с вытравленной системой сложных каналов в поверхностном слое спеклась с другой целой пластинкой в муфельной печи. Большими преимуществами обладают разборные микромодели [4], разборность которых реализуется за счет использования стекол с высокой плоскостностью, применяемых в оптической интерферометрии; картина пор микромодели отображает аншлиф нефтеносной породы, использовавшийся для изготовления фотошаблона. Прозрачные микромодели выгодно отличаются возможностью использования методов визуализации и непосредственного наблюдения за физико-химическими процессами, происходящими в порах структуры.

Использование прозрачной ячейки Хеле-Шоу, изготовленной методом мягкой фотолитографии, позволило визуально показать, что эффект динамического запираания обратных водонефтяных эмульсий при постоянно действующем перепаде давления в ячейке Хеле-Шоу со ступенчатым сужением объясняется образованием перед сужением структуры из микрокапель воды, представляющих дисперсную фазу в углеводородной эмульсии [5]. В работе [6] показано, что ультразвуковое воздействие (УЗВ) влияет на эффект динамического запираания, способно восстановить течение, однако не рассматривается как влияет УЗВ на дисперсные частицы – микрокапли воды. В работе [7] отмечено, что агрегативная и седиментационная устойчивость нефтяных высокопарафинистых дисперсных систем после УЗВ зависит от состава дисперсной среды, изменение вязкости объясняется разрушением межмолекулярных связей и перераспределением компонентов нефти между дисперсной фазой и дисперсионной средой нефтяной системы. В работе [8] продемонстрировано, что длительное УЗВ на акриловую суспензию приводит к седиментации дисперсной фазы: укрупнению частиц, а затем осаждению агломератов на стенках пробирки. В работе [9] исследовано влияние УЗВ на характеристики полимерных материалов, показано, что УЗВ в кавитационном режиме приводит к разрушению молекулярных связей, обеспечивает однородность структуры многокомпонентного материала и равномерное распределение армирующих частиц. В перечисленных работах [7–9] изменение вязкости после УЗВ объясняется разрушением межмолекулярных связей, однако проведенные опыты по течению эмульсий [5] показывают важную роль самих дисперсных частиц, их расположения, группировки в изменении вязкости, поэтому для того, чтобы оценить влияние УЗВ без учета слияния и диспергации капель, можно в качестве дисперсной фазы использовать недеформируемые твердые частицы.

Цель данной работы – изучение влияния УЗВ на поведение недеформируемых частиц в дисперсии при течении в ячейке Хеле-Шоу с постоянно действующим перепадом давления, проведение экспериментов, направленных на опосредованное, путем воздействия на стеклянные шарики, изучение влияния УЗВ на дисперсную фазу – микрокапли воды в эмульсии. Для достижения поставленной цели в работе проведены эксперименты по заполнению ячейки Хеле-Шоу стеклянными шариками с образованием объемной пористой структуры (физической модели пористой трещины) и течению шариков в объемной пористой структуре со ступенчатым сужением, в том числе под влиянием ультразвука.

Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве экспериментальной ячейки использовали модель трещины – ячейку Хеле-Шоу, образованную двумя оптическими стеклянными пластинами, между которыми для создания зазора зажимается фольга разной толщины с вырезанным окном. Входные и выходные отверстия высверлены в верхнем стекле, к ним подведены трубки. Экспериментальная установка приведена на рис. 1, использована схожая установка, что и в нашей ранней работе [10].

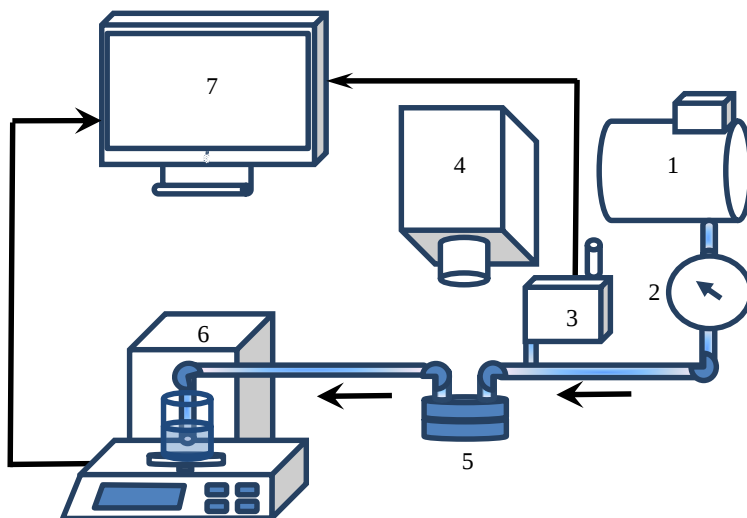


Рис. 1. Схема установки для проведения микрогидродинамических исследований и визуализации структуры течения

Fig. 1. Scheme of the experimental setup for microhydrodynamic studies and flow structure visualization

Подача воды проводилась при постоянном перепаде давления, который обеспечивался давлением газа от компрессора с ресивером (1) и контролировался образцовым манометром (2). Давление на входе ячейки Хеле-Шоу (5) измерялось тензометрическим датчиком MPX 5100 (3) и фиксировалось с помощью программы RS-Weight на персональном компьютере (ПК) (7). Объем жидкости, выходящей из ячейки (5), вытеснял из выходной трубки дистиллированную воду, которая поступала в мерный стакан, находящийся на прецизионных электронных весах

A&D GH-252 (6), для измерения расхода весовым методом по массе вытесняемой дистиллированной воды. На верхнюю поверхность воды в стакане налито машинное масло, слой масляной пленки предотвращает интенсивное испарение воды. Видеосъемка процессов, происходящих в ячейке Хеле-Шоу, проводилась камерой Sony DCR-TRV530E (4) с частотой 25 кадров в секунду и минимальной выдержкой, видеозахват с камеры обеспечивался программой VirtualDub. Показания датчика давления, весов и видеоизображение синхронизировались по времени и поступали на ПК (7).

Предварительно поверхности оптических пластин промывались последовательно бензином марки «Калоша» и этиловым спиртом. Стекланные пластины с окном, образованным фольгой между пластинами, помещались в обойму и зажимались винтами. Погрешности измеряемого объема определялись по массе дистиллированной воды, поступавшей на весы, которая считывалась 1 раз в секунду, и составляли 5% до достижения выходного отверстия, 1% до протекания одного объема ячейки и 0,1% при больших объемах; перепад давления контролировался датчиком давления с погрешностью в 1%. Отклонение расходных характеристик после разборки и сборки ячейки – не более 10% при малых расходах.

Гидравлическая система в эксперименте состоит из прямоугольной ячейки Хеле-Шоу и подводящих цилиндрических трубок (на вход и выход) с одним и тем же объемным расходом Q в сечениях. Падение давления при течении через ячейку Хеле-Шоу описывается формулой [8]

$$\Delta P_1 = \frac{3\mu l_1}{2bh^3} Q, \quad (1)$$

где μ – вязкость, l_1 – длина ячейки, b – ширина ячейки, h – половина зазора (глубины).

Перепад давления на каждой трубке определяется по формуле Пуазейля

$$\Delta P_i = \frac{8\mu l_i}{\pi R_i^4} Q, \quad (2)$$

где l_i – длина трубки, R_i – радиус трубки, $i = 2, 3, 4$.

Используя формулы (1) и (2), получаем отношение перепадов давления в трубке и ячейке:

$$\frac{\Delta P_i}{\Delta P_1} = \frac{16}{3\pi} \frac{bh^3 l_i}{R_i^4 l_1} \approx 1.7 \frac{bh^3 l_i}{R_i^4 l_1}. \quad (3)$$

Размеры прямоугольного канала в ячейке Хеле-Шоу: ширина $b = 2$ см, зазор $2h = 20$ мкм, длина $l_1 = 3,5$ см. В системе на входе (от датчика давления, манометра, до входного отверстия) вставлены короткая трубка (10 см) диаметром 1 мм (по формуле (3) $\Delta P_2/\Delta P_1 \approx 0.00155$, что соответствует 0,155%) и подводящая трубка (20 см) диаметром 2 мм ($\Delta P_3/\Delta P_1 \approx 1.9 \cdot 10^{-4}$, что соответствует 0,019%), а на выходе длинная (1 м) толстая трубка диаметром 3 мм, подходящая к стакану с водой на весах ($\Delta P_4/\Delta P_1 \approx 1.9 \cdot 10^{-4}$, что соответствует 0,019%). Суммарная потеря перепада давления на всех трубках, по сравнению с перепадом давления в ячейке, около 0,2%, ею в экспериментах пренебрегаем.

Приведем оценку размеров капель, удерживаемых капиллярными силами при создавшемся градиенте давления в модели. Капиллярное давление на цилиндрической поверхности составит $P_k = \sigma/h$, где σ – поверхностное натяжение. Перепад

давления на капле можно оценить из градиента давления в ячейке: $\nabla P = \Delta P / l_1$. Длину капли обозначим l_k , на ней будет перепад давления $l_k \cdot \nabla P$. Таким образом, размер капли при заданном градиенте давления будет определяться отношением: $l_k = P_k / |\nabla P| = \sigma l_1 / (h |\Delta P|)$. При перепаде давления $\Delta P = 20$ кПа, $h = 10$ мкм, $\sigma = 32$ мН/м, $l_1 = 3,5$ см размер защемленной капли будет $l_k = 5,6$ мм. При перепаде давления 50 кПа длина зажатых капель составит порядка 2 мм.

Трехмерная пористая структура

Экспериментальная установка – с обеспечением перепада давления с помощью компрессора – для всех экспериментов была одной и той же (см. рис. 1), менялись только изучаемые дисперсии, перепады давления и сами ячейки Хеле-Шоу. Изготовлена ячейка Хеле-Шоу следующим образом: между двух стеклянных оптических стекол зажат лист латунной фольги толщиной $2h = 190$ мкм, в котором сделано прямоугольное окошко со сглаженными углами длиной $l = 40$ мм, шириной $b = 20$ мм. Расход течения в данной модели находится по формуле (1). Для перепада давления $\Delta P = 10$ кПа при течении дистиллированной воды и заданных размерах расход равен 2.86 мл/с.

Ячейку планировалось заполнять стеклянными шариками, и в случае остановки движения воздействовать ультразвуком на полученную пористую модель. Использовались стеклянные шарики, предварительно просеянные через сито 70 мкм. С помощью программы ImageJ (программа в свободном доступе) рассчитано распределение по размерам для 122 шариков (табл. 1). Подавляющее большинство шариков оказалось в диапазоне 35–70 мкм.

Таблица 1

Распределение по размерам стеклянных шариков, просеянных через сито 70 мкм
(D – диаметр, n – относительное количество, N – количество)

D	0–10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
$n, \%$	0	0.8	1.6	3.3	3.3	8.2	11.5	12.3	11.5	17.2	12.3	10.7	6.6	0.8
N	0	1	2	4	4	10	14	15	14	21	15	13	8	1

Для того чтобы ограничить выход шариков из ячейки, перед выходным отверстием поставили кусок покровного стекла толщиной 150 мкм, уменьшающий сечение выходного отверстия; таким образом, зазор на выходе составил 40 мкм (толщина латунной фольги минус толщина покровного стекла). Предполагалось, что шарики займут плотную упаковку в несколько рядов по всей поверхности ячейки, и на выходе перед стеклом окажутся шарики с диаметром более 40 мкм, поскольку шарики с диаметром менее 40 мкм либо выйдут из ячейки, либо окажутся в плотной упаковке не в непосредственной близости от края со стеклом. Расчет участка с покровным стеклом по формуле (1) в данной модели показывает, что отношение локального перепада давления к перепаду давления в ячейке на данном участке на два порядка больше, чем в остальной зоне ячейки. Экспериментальный расход по течению дистиллированной воды до заполнения шариками оказался равен 0,59 мл/с, что в 4,8 раз ниже рассчитанного расхода (2,86 мл/с) при отсутствии шариков и покровного стекла, т.е. наличие покровного стекла привело к уменьшению расхода почти в 5 раз.

Суспензию из шариков (5% по массе) в дистиллированной воде при перепаде давления 20 кПа подавали во входное отверстие ячейки Хеле-Шоу. На рис. 2 приведены соответствующие эксперименту обработанные изображения, на которых слева видим входное отверстие, сверху и снизу – латунную фольгу, обеспечивающую зазор в ячейке, и движущуюся слева направо массу шариков. Часть ячейки, не занятая шариками, заменена белым цветом для удобства визуализации, кадры взяты в прямоугольных рамках. Шариками, по всей видимости, забились входное отверстие, уменьшили сечение, что привело к уменьшению потока жидкости, и поэтому движение замедлилось и остановилось (рис. 2, *a*). Затем, не убирая подаваемый перепад давления 20 кПа, ячейку поместили в наполненную водой ультразвуковую ванну CD-4820 ($V_{\max} = 2\,500$ мл, мощность 170 Вт, частота 42 кГц). В ультразвуке входное отверстие очистилось, и движение суспензии с шариками сразу возобновилось (рис. 2, *b*), за несколько секунд фронт течения стал выравниваться (рис. 2, *c*), и шариками в течение 13 с заняли ячейку (рис. 2, *d*).

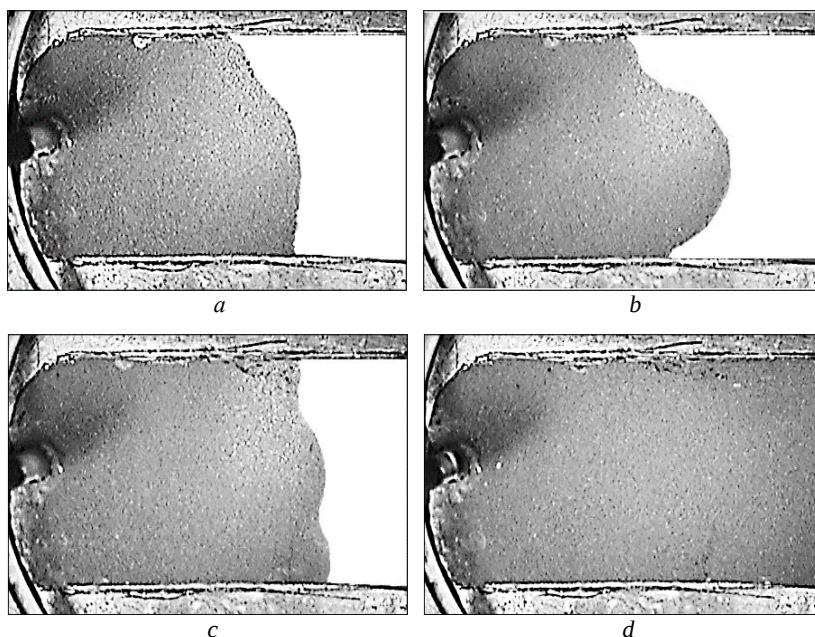


Рис. 2. Обработанные фотоизображения заполнения стеклянными шариками ячейки Хеле-Шоу (движение слева направо) при перепаде давления 20 кПа до и при ультразвуковом воздействии (УЗВ): (а) до УЗВ, (б) 1 с при УЗВ, (в) 5 с при УЗВ, (г) 13 с при УЗВ

Fig. 2. The processed photographs of the Hele-Shaw cell filling with glass spherules (left-to-right motion) at a pressure drop of 20 kPa before and during ultrasonic influence (USI): (a) before USI, (b) 1 second under USI, (c) 5 seconds under USI, and (d) 13 seconds under USI

Таким образом, ультразвуковое воздействие помогло распределить шариками и очистить входное отверстие. Поддержали ячейку несколько минут в ультразвуке для равномерного заполнения и распределения шариков по всей ячейке, наблюдая визуально за шариками: некоторые области были светлыми, поскольку шариками еще совершали движения в ультразвуке, а потом темнели, когда, уплотнившись,

шарики переставали двигаться, что подтверждалось наблюдением при большем увеличении микроскопа. Добившись визуального наблюдения уплотненной структуры шариков, мы провели проверочный эксперимент по течению дистиллированной воды через полученное устройство. Расход по воде составил 0.65 мкл/с при постоянно заданном перепаде давления 20 кПа. Для сравнения, экспериментальный расход для этой модели без шариков при перепаде давления 20 кПа составил около 1.18 мл/с, т.е. получается, что после заполнения ячейки шариками он уменьшился в 1 800 раз.

Как оказалось, в модели Хеле-Шоу с латунной фольгой вода частично просачивалась через латунный лист при перепаде давления свыше 200 кПа, поскольку из-за недостаточной деформации латунного листа создавались неоднородности по зазору. Вновь сделали аналогичное устройство ячейки Хеле-Шоу, постаравшись исправить минусы предыдущей модели. Ячейка, как и предыдущая, образована двумя оптическими стеклянными пластинами, между которыми зажимается фольга с вырезанным окном. Входные и выходные отверстия высверлены в верхнем стекле, к ним подведены трубки. Зазор обеспечили с помощью 20 слоев тонкой алюминиевой фольги толщиной 10 мкм, суммарный зазор составил 200 мкм. Неоднородности затяжки крепления болтов выравниваются фольгой, и вода не просачивается. В фольге вырезано окошко для фильтрации длиной 40 мм, шириной 10 мм. Расчетный расход по течению дистиллированной воды по формуле (1) при перепаде 10 кПа в данной ячейке составляет 1 667 мкл/с. Для изучения фильтрации в трехмерной модели с шариками на выходе ячейки поместили тот же кусок покровного стекла толщиной 150 мкм, делающий из-за разницы высот фольги и стекла зазор 40 мкм на выходе в качестве «забора» для шариков, и измерили расход по течению дистиллированной воды при перепаде давления 10 кПа, он составил 330 мкл/с. Уменьшение выходного отверстия за счет наличия покровного стекла привело к уменьшению расхода в 5 раз, отношение расходов согласуется с ранее приведенными результатами для ячейки Хеле-Шоу схожей конструкции.

Аналогично предыдущему эксперименту заполнили ячейку шариками с помощью ультразвуковой ванны. Измерили расход по течению дистиллированной воды, он составил 0.55 мкл/с при перепаде давления 20 кПа, что в 1 200 раз меньше расхода в ячейке со стеклом без шариков (660 мкл/с при перепаде давления 20 кПа). Экспериментально полученные расходы по течению дистиллированной воды для перепадов давления 10, 20, 30 и 50 кПа составили 0.43, 0.55, 1.24 и 2.30 мкл/с. Расход увеличивался непропорционально, сильнее с увеличением перепада давления, что, скорее всего, связано с потерями давления на трубках и низкой проницаемостью.

Далее был проведен эксперимент с шариками, просеянными через сито 150 мкм, распределение шариков по размерам представлено в табл.2.

В данном случае, несмотря на то что присутствует много мелких шариков (20–40 мкм), по объему преобладают крупные шарик. Эксперимент провели в той же ячейке Хеле-Шоу с алюминиевой фольгой (фильтрационное окно $40 \times 10 \times 0,2$ мм) и тем же куском покровного стекла толщиной 150 мкм на выходе ячейки, делающим из-за разницы высот фольги и стекла зазор 40 мкм на выходе. Расход по воде без шариков при перепаде давления 10 кПа составил 488 мкл/с. Заполнение ячейки в ультразвуке суспензией, содержащей в воде 5% по массе шариков, просеянных через сито 150 мкм, при перепаде давления 10 кПа представлено на рис. 3.

Таблица 2

Распределение по размерам стеклянных шариков, просеянных через сито 150 мкм (D – диаметр, n – относительное количество, N – количество)

D	0–9	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
n , %	0	0.6	1.7	5.1	9.7	9.7	5.1	7.4	4.0	2.3	4.5	1.7	3.4	2.8	1.7
N	0	1	3	9	17	17	9	13	7	4	8	3	6	5	3

D	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
n , %	2.8	1.7	4.0	4.5	2.3	1.1	5.1	3.4	4.0	4.0	1.7	2.3	1.7	0.6	1.1
N	5	3	7	8	4	2	9	6	7	7	3	4	3	1	2

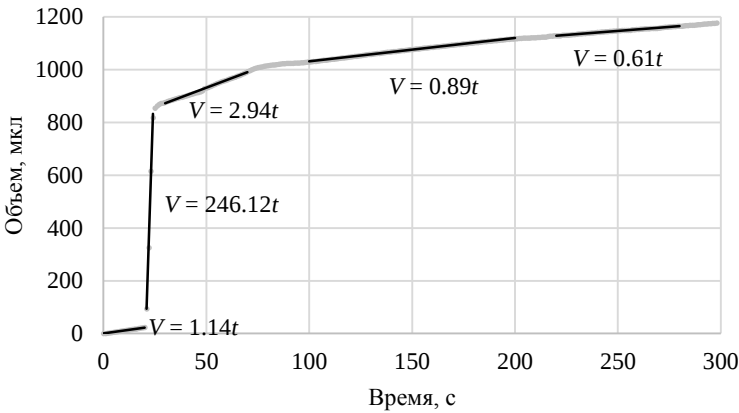


Рис. 3. Зависимость прошедшего объема от времени при заполнении ячейки Хеле-Шоу 5%-ной суспензией с шариками, просеянными через сито 150 мкм, при перепаде давления 10 кПа в ультразвуковой ванне CD-4820 (на 21-й с подали УЗВ). Приведенные на графике выражения объема (V) от времени (t) соответствуют отмеченным прямым линиям. Измерение проводилось каждую секунду, поэтому график имеет вид сплошной линии

Fig. 3. Dependence of the passed volume on time when filling the Hele-Shaw cell with a 5% suspension including spherules sieved through a 150 μm strainer at a pressure drop of 10 kPa in an ultrasonic bath CD-4820 (ultrasonic influence is applied at 21 seconds). The volume (V) – time (t) relations that are shown on the graph correspond to the highlighted straight lines. The measurements taken every second result in the solid line graph

На 21-й с включили ультразвук, и расход резко вырос: с 1.14 до 246.12 мкл/с, затем шарики стали заполнять ячейку, уменьшая проницаемость и, соответственно, уменьшая расход (см. рис. 3). Как и в эксперименте с более мелкими шариками (см. рис. 2), подача ультразвука приводит к активному движению, увеличение расхода связано с прочисткой выходного сужения, что привело к большому объему прошедших шариков. Далее шарики двигались более равномерно с расходом 2.94 мкл/с, который постепенно уменьшался по мере уплотнения шариками ячейки. Таким образом, благодаря ультразвуковому воздействию совместно с перепадом давления создается плотная упаковка шариков.

Экспериментальный расход течения дистиллированной воды в устройстве с шариками составил при 10 кПа – 2.56 мкл/с, 20 кПа – 5.44 мкл/с, 30 кПа – 7.87 мкл/с,

50 кПа – 12.60 мкл/с. Благодаря плотной упаковке шариков и однородному распределению расход по воде пропорционально возрастает с увеличением перепада давления. Для сравнения, у «мелких» шариков, просеянных через сито 70 мкм, где расход увеличивался непропорционально сильнее с увеличением перепада давления, при 50 кПа он составил 2.3 мкл/с, что в 5 раз ниже, чем полученное значение 12.60 мкл/с для шариков, просеянных через сито 150 мкм.

Экспериментальное изучение эффекта запирания в ячейке с сужением с помощью стеклянных шариков

Была подготовлена ячейка со ступенчатым сужением для изучения запирания дисперсной фазой, движение справа налево. Зазор, как и в предыдущей модели, обеспечивался с помощью 20 слоев тонкой алюминиевой фольги толщиной 10 мкм, суммарный зазор составил 200 мкм. В фольге вырезано окно для фильтрации согласно схеме (рис. 4). Справа отсек-камеру сделали шире левого отсека для возможности визуального наблюдения за движением шариков во входной зоне, чтобы шарики не скапливались на входе, как было бы в случае узкой камеры.

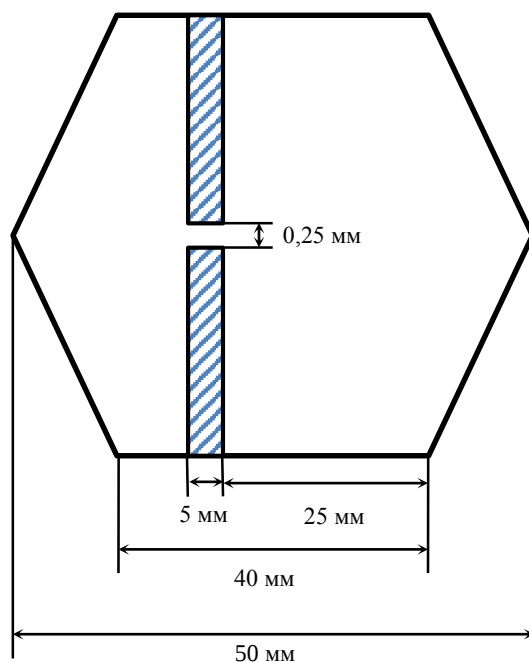


Рис. 4. Схематичное изображение фильтрационного окна ячейки с сужением
Fig. 4. Schematic representation of the filtration window in a cell with constriction

Приготовили суспензию «мелких» шариков (см. табл. 1) в дистиллированной воде (5% по массе), и при постоянном перепаде давления 10 кПа шарики запустили в ячейку (рис. 5, 6).

Спустя 11 с от начала эксперимента (см. рис. 6, *b*) видим, что ячейка преимущественно заполнена водой и, кроме входного отверстия, практически не отлича-

ется от фотоизображения начала движения (см. рис. 6, а). Это свидетельствует о том, что первые 10 с в ячейку попадала преимущественно водная фаза с небольшим содержанием шариков.

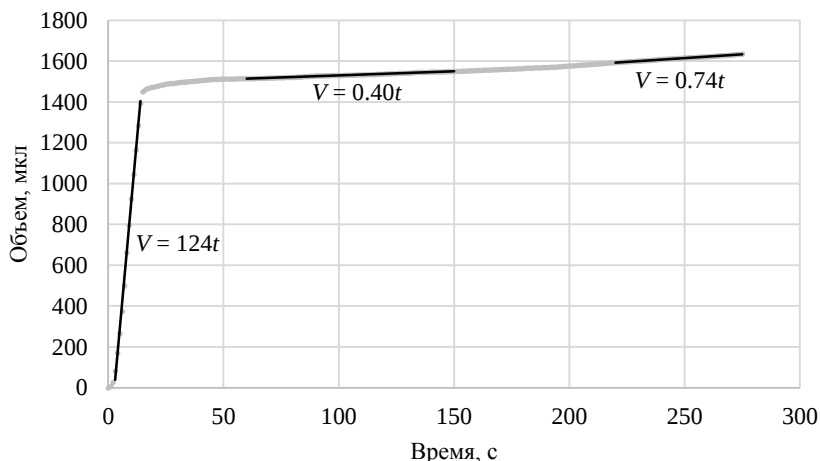


Рис. 5. Зависимость прошедшего объема от времени при заполнении ячейки Хеле-Шоу с сужением 5%-ной суспензией с шариками, просеянными через сито 70 мкм, при перепаде давления 10 кПа. Приведенные на графике выражения объема (V) от времени (t) соответствуют отмеченным прямым линиям. Измерение проводилось каждую секунду, поэтому график имеет вид сплошной линии

Fig. 5. Dependence of the passed volume on time when filling the Hele-Shaw cell with a 5% suspension including spherules sieved through a 70 μm strainer at a pressure drop of 10 kPa. The volume (V) – time (t) relations that are shown on the graph correspond to the highlighted straight lines. The measurements taken every second result in a solid line graph

На графике (см. рис. 5) первые 14 с расход высокий, что связано с активным движением суспензии, состоящей преимущественно из водной фазы, основная масса шариков еще не достигла сужения. На 11-й с начинается движение в ячейке большого скопления шариков, что отчетливо видно уже через секунду (см. рис. 6, с). На 15-й с расход резко падает (см. рис. 5), что связано с уменьшением сечения при попадании шариков в сужение на 13-й с (см. рис. 6, d); буквально за 2 с шарика «заблокировали» сужение, уменьшив проходное сечение. Вода продолжает проходить через сужение, однако движение шариков через сужение значительно сокращается и прекращается. На 13-й с, после достижения движущейся массой шариков сужения, видим зарождение второго «слоя» поступающих шариков, который останавливается примерно на 15-й с (см. рис. 6, e), что совпадает с резким уменьшением расхода на графике, связанным с тем, что попавшая в сужение плотная упаковка шариков уменьшила проходное сечение.

Далее начинается медленное движение верхнего третьего «слоя» шариков; этот «слой» более темный, а значит, концентрация шариков больше, упаковка более плотная (см. рис. 6, f). Полученная последовательность кадров схожа с картиной запираания микрокаплями воды в обратных водоуглеводородных эмульсиях, для которой также характерно волновое, пульсирующее течение перед запиранием.

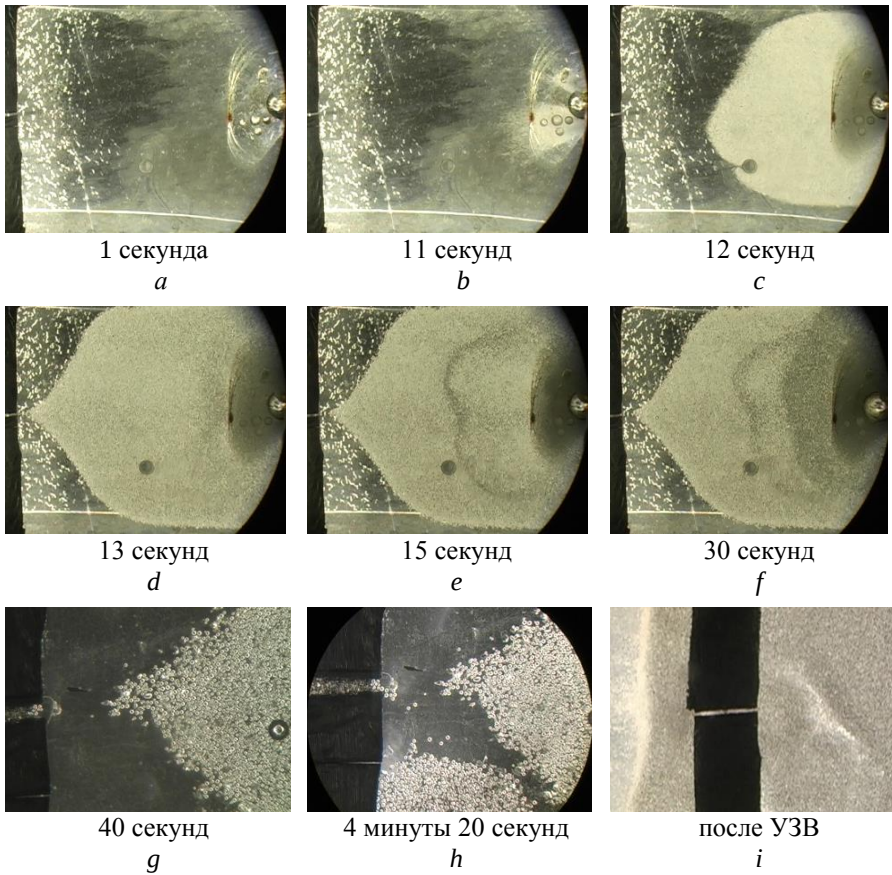


Рис. 6. Фотоизображения заполнения ячейки Хеле-Шоу с сужением 5%-ной суспензией с шариками, просеянными через сито 70 мкм, при перепаде давления 10 кПа (движение справа налево). Полуокружности на кадрах – ограничения видимой области камеры, установленной на микроскоп. Время от начала эксперимента приведено под кадрами

Fig. 6. Photographs of the filling of the Hele-Shaw cell with a constriction with a 5% suspension including spherules sieved through a 70 μm strainer at a pressure drop of 10 kPa (right-to-left motion). The semicircles indicate the limitations of the visible area of the camera arranged on a microscope. The time after the beginning of the experiment is given under the frames

Спустя 40 с от начала эксперимента (см. рис. 6, *g*) видим, что шарики перестают заходить в сужение, что связано с блокировкой сужения шариками и частицами из воздуха. Расход, равный 0.4 мкл/с (см. рис. 5), объясняется фильтрацией воды через структуру из шариков. Получается, что с начала движения с расходом в 120 мкл/с расход уменьшился в 300 раз. Отсек-камера постепенно заполняется шариками, но остаются области, не занятые шариками. Спустя 4 мин 20 с (см. рис. 6, *h*) видим движущееся вдоль нижней границы кадра скопление шариков, с этим также связано небольшое увеличение расхода на графике от 0.4 до

0.74 мл/с (см. рис. 5) за счет вытеснения воды в камере шариками, однако шарики по одному подходят к входу в сужение и, не заходя в него, останавливаются.

Далее остановили видеосъемку и, не убирая перепад давления 10 кПа, поместили ячейку в ту же ультразвуковую ванну CD-4820 на 3 мин. График зависимости течения при трехминутном УЗВ и после него представлен на рис. 7. После помещения в ультразвуковую ванну на 13-й с подали УЗВ (см. рис. 7), расход вырос с 0.16 до 1.57 мл/с, что связано с прочисткой сужения; шарики активно начали заполнять входную правую камеру и выходить в левую, заполняя пустые пространства в ячейке. Картина после УЗВ представлена на рис. 6, *i* для сравнения с кадрами до УЗВ и акцента на заполненную область.

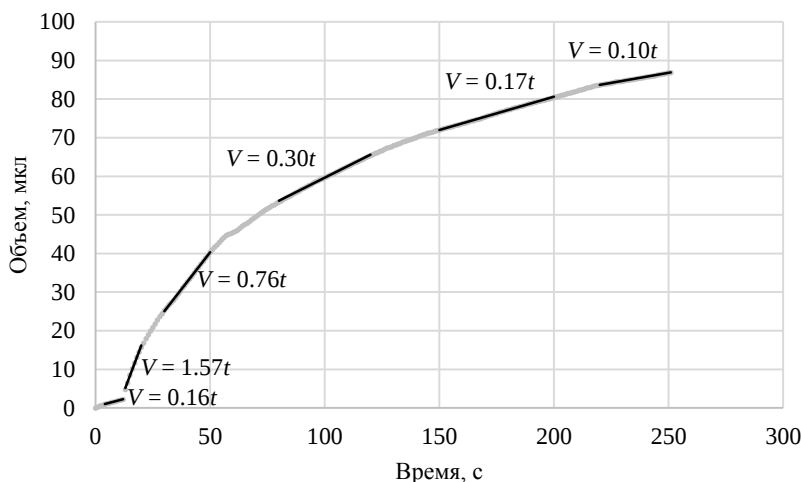


Рис. 7. Зависимость объема от времени при заполнении ячейки Хеле-Шоу с сужением 5%-ной суспензией с шариками при перепаде давления 10 кПа в ультразвуковой ванне CD-4820; на 13-й с подали УЗВ, которое длилось 3 мин. Последний участок графика соответствует выключенному УЗВ. Приведенные на графике зависимости объема (V) от времени (t) соответствуют отмеченным прямыми линиям. Измерение проводилось каждую секунду, поэтому график имеет вид сплошной линии

Fig. 7. Dependence of the passed volume on time when filling the Hele-Shaw cell with a constriction with a 5% suspension including spherules at a pressure drop of 10 kPa in an ultrasonic bath CD-4820; at 13 seconds, the 3-minute ultrasound influence (USI) is applied. The last section of the graph corresponds to the disabled USI. The volume (V) – time (t) relations that are shown on the graph correspond to the highlighted straight lines. The measurements taken every second result in a solid line graph

Постепенно расход плавно уменьшается до 0.17 мл/с (см. рис. 7), что связано с уплотнением ячейки шариками, блокировкой сужения. УЗВ подавали в течение 3 мин. Последний участок графика с расходом 0.10 мл/с характеризуется течением уже без УЗВ, остаточный незначительный расход долгое время сохраняется за счет фильтрации воды; без УЗВ перепада давления в 10 кПа недостаточно для движения уплотнившейся структуры из шариков.

Ультразвуковое воздействие оказалось очень важным для равномерного заполнения ячейки шариками как в объемной модели без сужения, так и в модели

с сужением. УЗВ при постоянном перепаде давления приводило к возобновлению течения в случае, когда шарики блокировали сужение, а после создания плотной структуры движение шариков замедлялось и останавливалось даже в ультразвуке.

Заключение

Представлены результаты экспериментального исследования влияния ультразвукового воздействия (УЗВ) на заполнение стеклянными шариками при постоянно действующем перепаде давления ячеек Хеле-Шоу, в том числе со ступенчатым сужением, являющихся физическими моделями трещины в нефтяном пласте.

Разработана установка с использованием методов визуализации для микрогидродинамических исследований. Все элементы установки управляются с компьютера, и результаты в синхронизованном виде сохраняются в нем (видеоизображения, показания датчика давления, весов).

Благодаря УЗВ и постоянно действующему перепаду давления достигаются плотная упаковка шариков и их однородное распределение. Расход по воде с шариками, просеянными через сито 150 мкм, в ячейке Хеле-Шоу с зазором 200 мкм пропорционально возрастал с увеличением перепада давления, в отличие от расхода шариков, просеянных через сито в 2 раза меньшего диаметра: он возрастал сильнее с увеличением перепада давления и был в 5 раз ниже для перепада давления 50 кПа. УЗВ при постоянном перепаде давления оказалось очень важным для равномерного заполнения ячейки шариками как в объемной модели без сужения, так и в модели с сужением; оно приводило к возобновлению течения в случае, когда шарики блокировали сужение. Можно с уверенностью предположить, что влияние УЗВ на микрокапли воды в эмульсии при возникновении запираания будет аналогичным, что косвенно подтверждается возобновлением с подачей УЗВ течения эмульсий, находящихся под влиянием эффекта динамического запираания [6]. Таким образом, УЗВ является качественным способом воздействия на эффект динамического запираания, обусловленный скоплением у входа в сужение микрокапель воды в углеводороде, что позволяет подойти к созданию технологии по увеличению доли трудноизвлекаемых запасов нефти в общем балансе добычи.

Список источников

1. Ахметов А.Т., Телин А.Г., Мавлетов М.В. Новые принципы применения обратных водо-нефтяных эмульсий в потокоотклоняющих технологиях и глушении скважин // Нефтегазовое дело. 2005. Т. 3. С. 119–126. URL: http://ngdelo.ru/files/old_ngdelo/2005/1/119-126.pdf
2. Ахметов А.Т., Саметов С.П. Особенности течения дисперсии из микрокапель воды в микроканалах // Письма в Журнал технической физики. 2010. Т. 36, вып. 22. С. 21–28. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14196>
3. Davis J.A., Jones S.C. Displacement mechanisms of micellar solutions // Journal of Petroleum Technology. 1968. V. 20 (12). P. 1415–1428. URL: doi: 10.2118/1847-2-PA
4. Нигматулин Р.И., Ахметов А.Т., Федоров К.М. О механизме вытеснения нефти из пористой среды мицеллярными растворами // Доклады АН СССР. 1987. Т. 293, № 3. С. 558–563. URL: <http://www.mathnet.ru/links/6a23ef4d31c7ac01deade4cbfe0ba73b/dan47862.pdf>
5. Рахимов А.А., Ахметов А.Т. Экспериментальные исследования гидродинамических эффектов при течении обратных водоуглеводородных эмульсий в микроканалах // Труды

- Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, № 1. С. 30–37. doi: 10.21662/uim2016.1.006
6. Рахимов А.А., Валиев А.А. Влияние агрегатного состояния дисперсной фазы и ультразвукового воздействия на течение эмульсий в микроканалах // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2017. Т. 12, № 2. С. 187–194. doi: 10.21662/uim2017.2.028
 7. Ануфриев Р.В., Волкова Г.И. Влияние ультразвука на структурно-механические свойства нефтей и процесс осадкообразования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 10. С. 50–58. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/33185/1/bulletin_tpu-2016-v327-i10-05.pdf
 8. Харисова З.И. Влияние ультразвукового воздействия на дисперсность водоземulsionных лакокрасочных материалов // Альманах современной науки и образования. 2016. Т. 103, № 1. С. 108–110. URL: https://www.gramota.net/articles/issn_1993-5552_2016_1_32.pdf
 9. Лопатин Р.А., Голых Р.Н., Хмелев В.Н., Минаков В.Д., Генне Д.В., Нестеров В.А. Экспериментальное исследование влияния ультразвукового кавитационного воздействия на сырьевые компоненты полимерного композита // Южно-Сибирский научный вестник. 2018. Т. 23, № 3. С. 94–98. doi: 10.25699/SSSB.2018.23.17563
 10. Валиев А.А., Ахметов А.Т., Рахимов А.А. Неустойчивое вытеснение в плоскопараллельном микроканале // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2020. № 65. С. 68–82. doi: 10.17223/19988621/65/5

References

1. Akhmetov A.T., Telin A.G., Mavletov M.V. (2005) Novye printsipy primeneniya obratnykh vodoneftnykh emul'siy v potokootklonyayushchikh tekhnologiyakh i glushenii skvazhin [New principals of application for invert emulsions in baffling technologies and killing of a well]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*. 3. pp. 119–126.
2. Akhmetov A.T., Sametov S.P. (2010) Features of water microdrop dispersion flow in microchannels. *Technical Physics Letters*. 36(11). pp. 1034–1037. doi: 10.1134/S1063785010110180
3. Davis J.A., Jones S.C. (1968) Displacement mechanisms of micellar solutions. *Journal of Petroleum Technology*. 20(12). pp. 1415–1428. doi: 10.2118/1847-2-PA
4. Nigmatulin R.I., Akhmetov A.T., Fedorov K.M. (1987) O mekhanizme vytesneniya nefi iz poristoy sredy mitsellyarnymi rastvorami [On the mechanism of oil displacement from a porous medium by micellar solutions]. *Doklady AN SSSR*. 293(3). pp. 558–563.
5. Rakhimov A.A., Akhmetov A.T. (2016) Eksperimental'nye issledovaniya gidrodinamicheskikh effektiv pri techenii obratnykh vodouglevodorodnykh emul'siy v mikrokanalakh [Experimental study of hydrodynamic effects in the inverse water hydrocarbon emulsions flow in microchannels]. *Trudy Instituta mekhaniki im. R.R. Mavlyutova Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN – Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics*. 11(1). pp. 30–37. doi: 10.21662/uim2016.1.006
6. Rakhimov A.A., Valiev A.A. (2017) Vliyanie agregatnogo sostoyaniya dispersnoy fazy i ul'trazvukovogo vozdeystviya na techenie emul'siy v mikrokanalakh [Influence of the aggregate state of the dispersed phase and ultrasonic effect on the flow of emulsions in microchannels]. *Trudy Instituta mekhaniki im. R.R. Mavlyutova Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN – Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics*. 12(2). pp. 187–194. doi: 10.21662/uim2017.2.028
7. Anufriev R.V., Volkova G.I. (2016) Vliyanie ul'trazvuka na strukturno-mekhanicheskie svoystva neftei i protsess osadkoobrazovaniya [Influence of ultrasonic treatment on structural-mechanical properties of oil and sedimentation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 327(10). pp. 50–58.

8. Kharisova Z.I. (2016) Vliyanie ul'trazvukovogo vozdeystviya na dispersnost' vodo-emul'sionnykh lakokrasochnykh materialov [Influence of ultrasonic exposure on dispersion of water-emulsion paintwork materials]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya – Almanac of Modern Science and Education*. 103(1). pp. 108–110.
9. Lopatin R.A., Golyh R.N., Khmelev V.N., Minakov V.D., Genne D.V., Nesterov V.A. (2018) Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya ul'trazvukovogo kavitatsionnogo vozdeystviya na syr'evye komponenty polimernogo kompozita [Experimental study of the influence of ultrasonic cavitation on raw-material components of the polymeric composite]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik – South-Siberian Scientific Bulletin*. 23(3). pp. 94–98. doi: 10.25699/SSSB.2018.23.17563
10. Valiev A.A., Akhmetov A.T., Rakhimov A.A. (2020) Neustoychivoe vytesnenie v plosko-parallel'nom mikrokanale [Unstable displacement in a plane-parallel microchannel]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 65. pp. 68–82. doi: 10.17223/19988621/65/5

Сведения об авторах:

Рахимов Артур Ашотович – научный сотрудник лаборатории «Экспериментальная гидродинамика» Института механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия. E-mail: ragar83@mail.ru

Валиев Азат Ахматович – младший научный сотрудник лаборатории «Экспериментальная гидродинамика» Института механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия. E-mail: azatphysic@mail.ru

Information about the authors:

Rakhimov Artur A. (Candidate of Physics and Mathematics, Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa, Russian Federation). E-mail: ragar83@mail.ru

Valiev Azat A. (Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa, Russian Federation). E-mail: azatphysic@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2022; принята к публикации 01.12.2022

The article was submitted 27.01.2022; accepted for publication 01.12.2022