03

Экспериментальное изучение двухкомпонентного потока жидкости в силикатных капиллярах

© Д.А. Важенин, Б.В. Григорьев, О.А. Кузина, Д.В. Вахнина

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
E-mail: d.a.vazhenin@utmn.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2026 г.
В окончательной редакции 27 августа 2026 г.
Принято к публикации 27 августа 2026 г.

Представлены зависимости перепада давления от расхода при протекании двухкомпонентного потока в двух характерных формах капилляров с разной смачиваемостью поверхности. Установлено, что при повышении перепада давления до 1 kPa и расходе выше 5 ml/h появляются признаки образования эмульсии. В ходе экспериментальных наблюдений обнаружено, что при протекании смеси дизельного топлива и воды в соотношении 50/50 со скоростью потока 5 ml/h течение в капиллярах приобретает вихревой характер, что нуждается в дальнейшем исследовании.

Ключевые слова: капилляр, перепад давления, расход флюида, гидрофильность, краевой угол смачивания.

DOI: 10.61011/PJTF.2027.01.64114.20833

Всестороннее изучение течения разнообразных флюидов по микро- и нанокапиллярам имеет важное прикладное значение для решения задач не только нефтяной отрасли, но и микробиологии, микроэлектроники, авиации, аграрного хозяйства и т. д. Так, например, в биологии изучение течений в капиллярах помогает понять процесс поднятия жидкости от корней к листьям деревьев, а в микроэлектронике течение жидкости по капиллярам исследуется с целью правильного охлаждения процессоров, работающих на больших тактовых частотах. В нефтегазовой сфере капилляры могут рассматриваться как микротрещины и поры горных пород нефтяного пласта, что позволяет проводить лабораторные эксперименты и на их основе создавать математические модели движения флюидов в пласте. В свою очередь точное понимание и прогнозирование движения флюидов в горных породах определяет повышение эффективности нефтедобычи.

Основной проблемой в изучении характера течения одно- и многофазных флюидов в пористых средах является создание всех сопутствующих условий для проведения исследований. Так, при определении относительной фазовой проницаемости керна следует учитывать вязкость и плотность прокачиваемой жидкости, температурные условия, при которых проводится эксперимент, и перепад давления, возникающий в образце горной породы [1,2]. Такие опыты показывают, насколько проницаем образец горной породы, выбранной для исследования. На основе этих данных можно сделать вывод о том, при каких условиях через пласт будет проходить фильтрация [3], а также какая доля вытесняемого флюида останется неизвлеченной.

Как известно, горная порода имеет совокупность пор различной разветвленности, геометрии и размеров, при этом аналогичная неоднородность сохраняется и при работе с подготовленным керном. Поэтому проницаемость и пористость, определяемые на образце горной породы, носят усредненный характер, так как не учитывается фильтрация жидкости в отдельно взятой поре. Поэтому для детального изучения характера течения флюидов в пористой среде можно выделить некоторую контрольную пору, которую удобно рассматривать в виде стеклянного капилляра. Благодаря тому что кварцевое стекло и осадочные алюмосиликатные породы имеют схожие углы смачивания, возможно проведение измерений на отдельных стеклянных капиллярах, а полученные результаты потенциально могут быть обобщены на породу в целом.

Изучению течения жидкостей и газов в капиллярах посвящено множество отечественных [4,5] и зарубежных [6–8] работ, при этом авторами отмечается, что характер течения для систем жидкость–жидкость существенно отличается от такового для газожидкостных систем, особенно в ситуациях, когда плотность и вязкость жидкостей близки между собой. Подробным экспериментальным изучением течений двух несмешивающихся жидкостей в капиллярах занимается ряд авторов [9–11], которые воспроизводили разные режимы течений в системе вода–органический флюид и представили режимные карты в координатах абсолютных или приведенных значений расходов каждого флюида. Такие режимные карты позволяют предсказать характер течения в широких диапазонах расхода, но их недостатком остается привязка к геометрии канала и свойствам органической жидкости, поэтому сопоставление результатов разных авторов при различных начальных параметрах будет носить качественный, а не количественный характер, что указывает на актуальность получения новых экспериментальных данных.

Таблица 1. Зависимость краевого угла смачивания жидкости от вида поверхности

Поверхность стекла	Краевой угол смачивания $\theta, ^\circ$	
	Дистиллированная вода	Дизельное топливо
Не обработанная силиконовым маслом	~ 17	~ 7
Обработанная силиконовым маслом	~ 35	~ 2.5

Помимо перечисленного часто теоретическое описание течения флюидов в капиллярах может отличаться от эксперимента, что подтверждается в работе [12], поэтому целью настоящего исследования является точное проведение экспериментов и описание их результатов с учетом факторов, влияющих на результат, таких как смачиваемость поверхности капилляра, форма капилляра, соотношение компонентов в потоке и величина расхода флюидов.

В качестве объекта моделирования единичных пор горных пород были использованы стеклянные капилляры длиной 250 mm двух видов: прямой (с постоянным внутренним диаметром 0.7 mm) и вытянутый (с перепадом диаметров от 0.032 до 0.7 mm). Характеристики и способы изготовления вытянутых капилляров были описаны в работе [13].

В качестве флюидов для проведения серии экспериментов использовались:

— дистиллированная вода (плотность $\rho = 1000\,\mathrm{kg/m^3}$, вязкость $\eta = 0.96\,\mathrm{mPa{\cdot}s}$, поверхностное натяжение $\delta = 73 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{N/m}$);

— дизельное топливо (ДТ) летнее ($\rho = 835\,\mathrm{kg/m^3}$, $\eta = 4.19\,\mathrm{mPa \cdot s}$, $\delta = 30 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{N/m}$).

Представленные характеристики определялись на лабораторном оборудовании при температуре $20 \pm 1\,^\circ\mathrm{C}$. Приборная погрешность измерений плотности составила $\pm 1\,\mathrm{kg/m^3}$, вязкости $\pm 0.01\,\mathrm{mPa \cdot s}$, поверхностного натяжения $\pm 1 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{N/m}$.

Для воссоздания движения флюидов в горных породах при проведении эксперимента следует учесть, что поверхность пор может иметь разную величину гидрофильности, определяемую разными породообразующими минералами (например, алюмосиликатные минералы лучше смачиваются водой, чем карбонатные). Поэтому участки порового пространства с малым краевым углом смачивания способствуют интенсивному растеканию воды с образованием сплошной пленки, тогда как области с большим краевым углом смачивания, напротив, препятствуют смачиванию, что приводит к сохранению капельной структуры жидкости.

В качестве гидрофильной поверхности с малым краевым углом смачивания использовались стеклянные капилляры, не подвергавшиеся никакой обработке. Для увеличения краевого угла смачивания на стеклянную поверхность был нанесен слой силиконового масла ($\rho = 918\,\mathrm{kg/m^3}$, $\eta = 4.1\ \mathrm{mPa \cdot s}$). Для этого капилляр закреплялся вертикально, после чего в него заливалось масло. Под действием гравитационной силы масло стекало вниз по внутреннему диаметру капилляра. Данная процедура проводилась несколько раз для полного распределения силиконового масла по поверхности. Затем капилляр без изменения его положения помещался в сушильную печь на 3 h при температуре $60\,^\circ\mathrm{C}$ для стекания остатков масла. После нанесения силиконового масла на внутреннюю поверхность силикатного стекла измерялся краевой угол смачивания θ для воды и дизельного топлива. Данные представлены в табл. 1.

Измерение краевого угла смачивания проводилось по методике сидячей капли: на подготовленную исследуемую поверхность стекла из аналогичного капиллярам состава наносилась капля жидкости и с помощью микроскопа с линейной шкалой определялись диаметр и высота капли на поверхности. В таком случае расчет краевого угла смачивания производится по формуле

$$\mathrm{tg}\,\frac{\theta}{2} = \frac{2h}{d},$$

где h — высота капли, d — диаметр капли на поверхности твердого тела.

Погрешность измерений краевого угла смачивания не превышает 1 %, количество повторов измерений — 5.

Для проведения исследований использовалась установка, описанная в работах [12,13]. Методика экспериментов заключалась в следующем: в горизонтально закрепленный капилляр подавалась вода для вытеснения воздуха, чтобы исключить его влияние на результаты эксперимента. Далее через тройник осуществлялась одновременная подача воды и дизельного топлива, а на байпасные линии подключались трубки для датчика перепада давления, который фиксировал данные в режиме реального времени. Процесс течения двухкомпонентного потока записывался с помощью цифрового оптического микроскопа с функцией фото- и видеофиксации Микмед WiFi 2000X 5.0. Расход потока задавался в интервале от 0.6 до 20 ml/h. Это соответствует диапазону расходов, используемых в установках для определения относительной фазовой проницаемости при стандартных керновых исследованиях [14].

В результате исследований были получены значения перепада давления в зависимости от соотношения объемного расхода жидкостей в потоке к их общему расходу

Таблица 2. Зависимость перепада давления от расхода при различных соотношениях объемных долей жидкостей (ДТ/вода)

Поверхность капилляра	Капилляр [13]	Общий расход жидкости, ml/h	Перепад давления на концах капилляра, kPa (в скобках указано число $\mathrm{Re} \cdot 10^{-5}$)				
			10/90	25/75	50/50	75/25	90/10
Не обработанная силиконовым маслом	Прямой	0.6	0.76 (25.8)	0.45 (20.3)	0.39 (13.6)	0.1 (9.1)	0.67 (7.1)
		2	1.04 (86.1)	2.44 (67.8)	0.43 (45.3)	0.85 (30.2)	0.51 (23.7)
		5	1.25 (215.4)	2.58 (169.4)	0.61 (113.3)	1.13 (75.6)	0.67 (59.2)
		10	1.23 (430)	2.45 (338.8)	0.85 (226.6)	3 (151.2)	1.16 (118.5)
		15	0.68 (646.2)	0.79 (508.1)	1.26 (339.9)	1.29 (226.8)	0.73 (177.8)
		20	1.4 (861.6)	2.43 (677.5)	2.77 (453.2)	2.58 (302.5)	1.73 (237.1)
Обработанная силиконовым маслом	Прямой	0.6	0.34 (25.8)	0.16 (20.3)	0.39 (13.6)	0.10 (9.1)	0.17 (7.1)
		2	1.17 (8.6)	0.29 (6.7)	1.19 (4.5)	0.04 (3.1)	0.20 (2.3)
		5	1.48 (215.4)	1.07 (169.4)	4.38 (113.3)	0.78 (75.6)	0.76 (59.2)
		10	2.84 (430.8)	3.02 (338.8)	3.85 (226.6)	1.24 (151.2)	1.3 (118.5)
		15	0.41 (646.2)	0.62 (508.1)	1.15 (339.3)	0.60 (226.8)	0.39 (177.8)
		20	4.91 (861.6)	1.16 (677.5)	0.94 (453.2)	1.28 (302.5)	2.18 (237.1)
Не обработанная силиконовым маслом	Вытянутый	0.6	0.07 (565.4)	0.28 (9752.9)	0.38 (297.4)	0.30 (198.5)	0.18 (155.6)
		2	0.22 (1884.7)	0.25 (32419.6)	0.32 (993.1)	0.64 (661.7)	0.22 (518.6)
		5	0.24 (4711.9)	0.25 (81409)	0.47 (2478.3)	0.85 (1654.3)	0.33 (1296.7)
		10	0.47 (9423.9)	0.75 (162098.1)	1.34 (4956.5)	1.07 (3308.6)	0.59 (2593.4)
		20	0.79 (18847.8)	2.85 (324196.1)	4.25 (9913)	2.51 (6617.2)	1.16 (5186.8)
Обработанная силиконовым маслом	Вытянутый	0.6	0.28 (565.4)	0.21 (9725.9)	0.15 (297.4)	0.13 (198.5)	0.09 (155.6)
		2	0.16 (1884.7)	0.17 (32419.6)	0.32 (991.3)	0.07 (661.7)	0.13 (518.6)
		5	0.39 (4711.9)	0.33 (81049)	0.52 (2478.3)	0.23 (1654.3)	0.25 (1296.7)
		10	0.39 (9423.9)	0.39 (162098.1)	0.43 (4956.5)	0.54 (3308.6)	0.57 (2593.4)
		20	0.80 (18847.8)	0.71 (324196.1)	1.04 (9913.1)	1.13 (6617.2)	1.19 (5186.8)

(табл. 2). Погрешность значений перепада давления составляет 0.5 % по паспорту прибора.

Также авторами был проведен расчет числа Рейнольдса для всех расходов течений в зависимости от соотношения объемных долей жидкостей в потоке по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{mix} v d}{\mu_{mix}},$$

где ρ_{mix} — плотность смеси [kg/m^3], v — скорость потока [m/s], d — диаметр капилляра [m], для случая

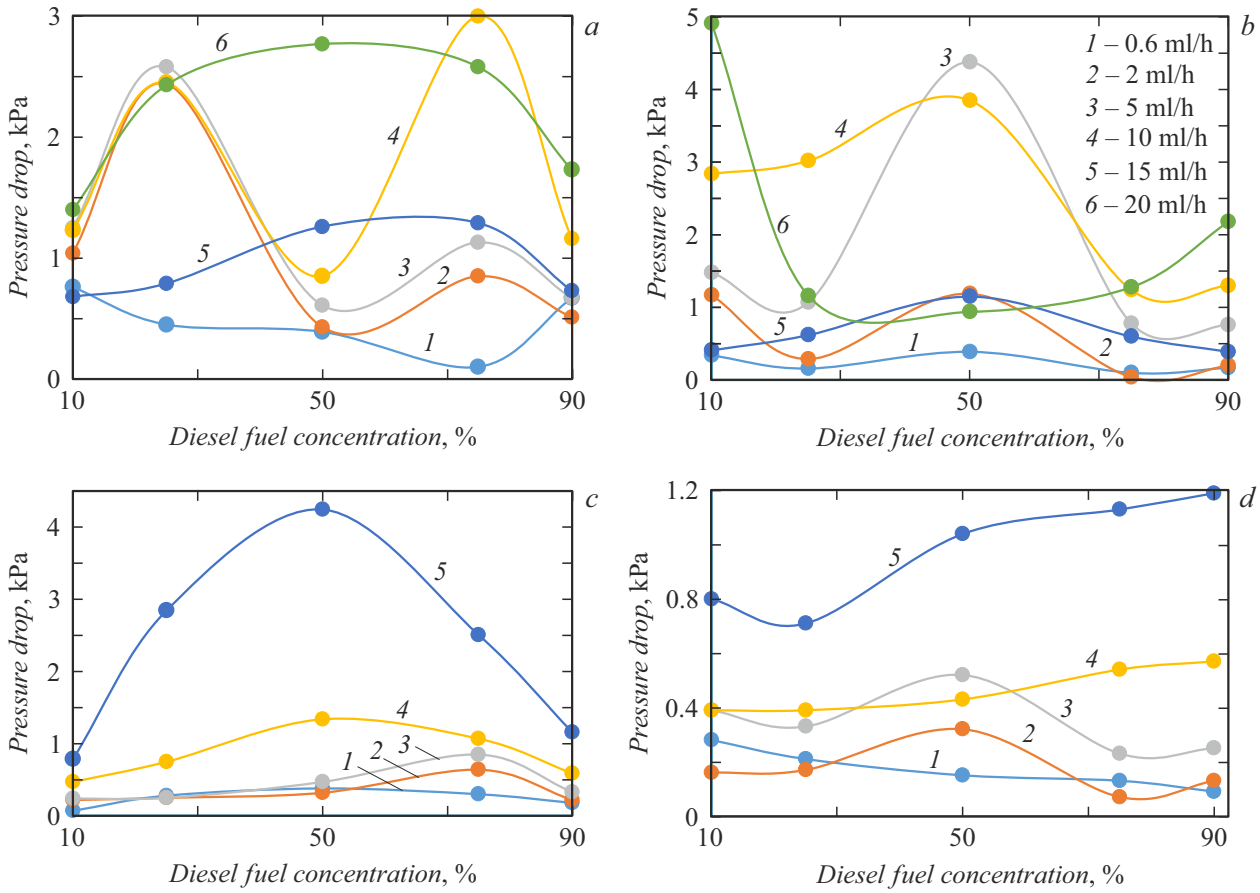


Рис. 1. Зависимости перепада давления от доли дизельного топлива в потоке при различных значениях общего расхода в прямом капилляре без обработки (*a*), прямом капилляре с силиконовым покрытием (*b*), вытянутом капилляре без обработки (*c*) и вытянутом капилляре с силиконовым покрытием (*d*).

прямого капилляра это 0.7 mm, для вытянутого диаметр самого узкого сечения 0.032 mm, μ_{mix} — динамическая вязкость смеси [mPa · s].

Так как в капилляре протекала смесь из двух жидкостей, расчет общей плотности потока проводился по следующей формуле:

$$\rho_{mix} = C_w\rho_w + C_{df}\rho_{df},$$

где ρ_w — плотность воды [kg/m^3], ρ_{df} — плотность ДТ [kg/m^3], C_w — объемная доля воды в смеси, C_{df} — объемная доля ДТ в смеси.

В свою очередь общая вязкость смеси рассчитывалась по формуле

$$\ln\mu_{mix} = C_w\ln\mu_w + C_{df}\ln\mu_{df},$$

где μ_w — динамическая вязкость воды [mPa · s], μ_{df} — динамическая вязкость ДТ [mPa · s].

Разброс значений числа Рейнольдса для всех представленных в табл. 2 случаев находится в пределах от 0.00007 до 3.24, что должно указывать на общий ламинарный режим течения в капиллярах.

Исходя из графиков на рис. 1, построенных по данным табл. 2, можно сделать вывод, что чувствительность перепада давления у прямого капилляра к составу флюида и расходу оказалась выше, чем у вытянутого капилляра, несмотря на ожидание влияния переменного сечения вытянутого капилляра на перепад давления при смене соотношения фаз и расхода. В вытянутом капилляре только минимально задаваемый расход показывает заметное влияние на перепад давления при смене соотношений фаз, что, вероятно, можно связать с напряжением сдвига. Для прямого капилляра характерна синусоидальная картина колебаний перепада давления от расхода к расходу, что связано со сменой характера течения при изменении соотношений фаз в потоке. При этом, если принять во внимание экспериментальную погрешность, чем выше расход, тем отчетливее эти колебания, за исключением расхода 20 ml/h. Интересной кажется еще и инверсия величины перепада при одних и тех же расходах для прямого капилляра без нанесения и с нанесением силиконового масла: величины перепада находятся в противофазе при каждом соотношении компонентов, что указывает на влияние величины краевого угла смачивания стенки капилляра. На рис. 2 приведен наиболее показательный случай — при расходе 2 ml/h, хотя при других расходах инверсия также наблюдается, но она менее выражена.

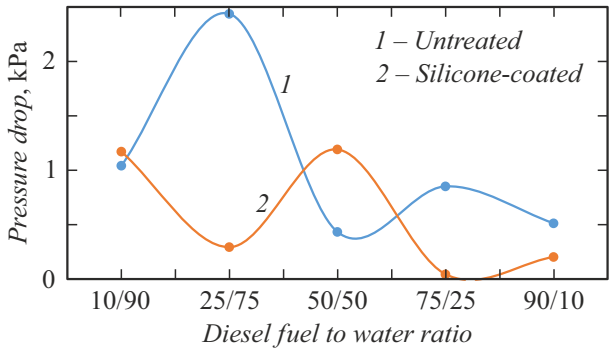


Рис. 2. Зависимость перепада давления от соотношения дизельного топлива и воды в потоке при расходе 2 ml/h.

Еще одной особенностью течения двухкомпонентной смеси по прямому капилляру было то, что при отношении доли воды к доле ДТ 10/90 и расходах 0.6–2 ml/h поток двигался по капилляру ровными малыми порциями, во всех остальных случаях (5–20 ml/h) происходило разделение потока на два компонента: дизельное топливо сверху, а вода снизу. Также в процессе исследования было обнаружено, что при перепаде давления свыше 1 kPa и доле воды в смеси от 10 до 25 % потоки жидкостей внутри капилляра образуют эмульсию (рис. 3). Полученная эмульсия является обратной, так как капли воды находятся в потоке дизельного топлива.

Особый интерес представляет режим фильтрации водонефтяной эмульсии в соотношении фаз 50/50 при расходе 5 ml/h, в котором возникало вихревое течение (рис. 4), наблюдение которого противоречило расчетному значению, соответствующему ламинарному течению. Для лучшего визуального наблюдения этого процесса в капилляр в процессе фильтрации вводили кварцевые частицы размером ~ 0.01 mm. Данные частицы инертны к прокачиваемым жидкостям, поэтому подходят в качестве маркеров в потоке флюидов. Наблюдение такого движения уже было упомянуто в работах [7,8] для газожидкостной смеси. Это доказывает, что полученный результат не является ошибкой эксперимента, однако характер такого течения требует дополнительного изучения.

В результате экспериментов установлено, что при различных расходах и объемных долях жидкостей образуются разные формы течения в капилляре с различными поверхностями. Так, при малых (0.6–2 ml/h) расходах в капилляре с малым краевым углом смачивания жидкости двигались порциями, а в капилляре с большим краевым углом флюиды при том же расходе разделились на две фазы. Также в ходе наблюдений было обнаружено, что в процессе фильтрации при течении 5 ml/h и соотношении компонентов 50/50 течение в капилляре приобрело вихревой характер. Подобный эффект был описан в работе [7] для газожидкостной смеси. В ситуации, описанной в [7], основными причинами этого эффекта являлись перепад давления, сил трения и капиллярных эффектов, но в случае системы вода–дизельное топливо, рассмотренном в настоящей работе, интерпретация этого явления требует дополнительного изучения.

Анализ экспериментальных данных показывает, что перепад давления в капиллярах определяется комплексным влиянием геометрии канала, величины смачиваемости поверхности и состава потока. Наиболее высокие и нестабильные значения перепада давления характерны для прямых капилляров, где поверхность с большим краевым углом при высоких расходах провоцирует резкие скачки сопротивления, тогда как в вытянутых капиллярах перепады давления существенно ниже и стабильнее независимо от смачиваемости, что указывает на доминирующую роль геометрии. Максимальные пиковые нагрузки зафиксированы при равном соотношении дизельного топлива и воды (50/50), что указывает на образование эмульсий, создающих дополнительное гидравлическое сопротивление. При этом зависимость перепада давления от расхода жидкости носит нелинейный характер: рост скорости потока не всегда ведет к пропорциональному увеличению сопротивления из-за структурных перестроек течения внутри канала.



Рис. 3. Образование эмульсии внутри капилляра.

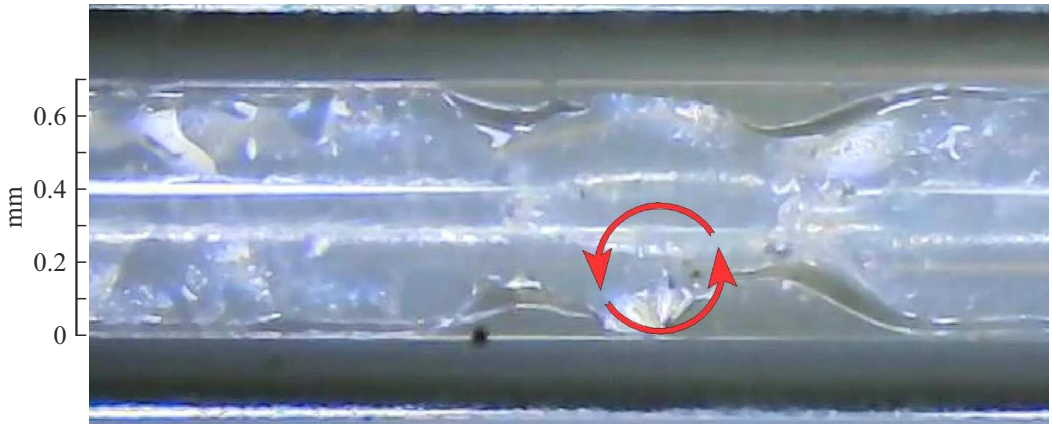


Рис. 4. Вихревое течение в капилляре. Стрелками показано направление движения частицы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.Б. Шабаров, А.В. Шаталов, Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, **2** (2), 50 (2016). DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-50-72
[2] В.И. Лесин, Нефтегазовое дело, № 5, 74 (2020). DOI: 10.17122/ogbus-2020-5-74-92
[3] Т.П. Любимова, С.А. Прокопьев, Т.Н. Загвозкин, в сб. *XII Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики* (Башкир. гос. ун-т, Уфа, 2019), т. 2, с. 1056–1057. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-congress-v2
[4] В.В. Кузнецов, *Экспериментальное исследование локальных характеристик газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах*, канд. дис. (Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 2022).
[5] В.Ц. Ванчиков, Инженерная физика, № 2, 30 (2005).
[6] R. Pohorecki, P. Sobieszuk, K. Kula, Chem. Eng. J., **135** (S1), S185 (2008). DOI: 10.1016/j.cej.2007.07.031
[7] J. Yue, L. Luo, Y. Gonthier, Chem. Eng. Sci., **63** (16), 4189 (2008). DOI: 10.1016/j.ces.2008.05.024
[8] Е.В. Ребров, Теоретические основы химической технологии, **44** (4), 371 (2010). [E.V. Rebrov, Theor. Found. Chem. Eng., **44** (4), 355 (2010). DOI: 10.1134/S0040579510040019]
[9] M. Darekar, K.K. Singh, S. Mukhopadhyay, K.T. Shenoy, Ind. Eng. Chem. Res., **56** (42), 12215 (2017). DOI: 10.1021/acs.iecr.7b03164
[10] Y. Zhao, G. Chen, Q. Yuan, AIChE J., **52** (12), 4052 (2006). DOI: 10.1002/aic.11029
[11] A.-L. Dessimoz, L. Cavin, A. Renken, L. Kiwi-Minsker, Chem. Eng. Sci., **63** (16), 4035 (2008). DOI: 10.1016/j.ces.2008.05.005
[12] А.А. Велижанин, О.А. Симонов, Актуальные проблемы нефти и газа, № 2 (14), 17 (2016).
[13] А.А. Велижанин, Б.В. Григорьев, С.Г. Никулин, Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, **8** (4), 66 (2022). DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-66-80
[14] *Нефть. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации*, ОСТ 39-235–89 (Миннефтепром СССР, М., 1989).