

УДК 533.1

УВЕЛИЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЫТЕСНЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕФТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ В МИКРОПУЗЫРЬКОВОМ РЕЖИМЕ ФИЛЬТРАЦИИ

А. В. Радаев, А. Н. Сабирзянов*

Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, 420111 Казань, Россия

* Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015 Казань, Россия

E-mails: radaev_neftianik@mail.ru, sabirz@kstu.ru

Разработан экспериментальный стенд для исследования вытеснения нефти с использованием сверхкритических флюидных систем из насыпных и составных однородных пористых материалов в режиме смешивающейся и микропузырьковой фильтрации смеси нефть — сверхкритический диоксид углерода. Создано устройство для визуализации выхода микропузырьков сверхкритического CO_2 из экспериментальной ячейки с пористой средой. Экспериментально исследован процесс вытеснения нефти сверхкритическим CO_2 и оторочками сверхкритического CO_2 и воды из однородной насыпной пористой среды. Показано, что наиболее эффективным режимом вытеснения вязкой нефти сверхкритическим CO_2 является смешивающийся, для повышения эффективности вытеснения вязкой нефти в микропузырьковом режиме необходимо использовать оторочки сверхкритического CO_2 и воды. Описан механизм увеличения нефтеотдачи в области микропузырькового вытеснения вязкой нефти сверхкритическим CO_2 .

Ключевые слова: сверхкритический флюид, коэффициент вытеснения нефти, двухфазная фильтрация, микропузырьковый режим вытеснения, оторочки сверхкритического CO_2 и воды.

DOI: 10.15372/PMTF20220112

Введение. В соответствии с современными представлениями газы и сверхкритические флюиды могут находиться в нефтяном пласте в трех состояниях: растворенные в нефти; микропузырьки, окклюдированные в нефти; свободный газ [1]. При этом интенсивность вытеснения нефти из пористой среды газами, находящимися в свободном состоянии, невелика, а максимальные значения коэффициента извлечения нефти не превышают пороговых значений для традиционных методов увеличения нефтеотдачи [2]. Это обусловлено тем, что при закачке газовых вытесняющих агентов происходит образование так называемых вязкостных языков — вязкостной неустойчивости, при которой вследствие значительно-го различия вязкостей вытесняющего агента и вытесняемой нефти вытесняющий агент в газообразном или жидком состоянии прорывается в добывающую скважину, оставляя за собой области невытесненной нефти [3].

Наиболее технологически эффективным методом интенсификации нефтеотдачи является вытеснение нефти в смешивающемся режиме. Однако при вытеснении вязких и высоковязких нефтей достижение смешивающегося режима затруднительно вследствие низкой растворимости в них диоксида углерода.

Исследованию смешивающегося режима вытеснения нефти различными газами, в том числе диоксидом углерода, при докритических параметрах состояния посвящено большое количество работ [4–13]. Исследованию микропузырькового режима течения газов в пористой среде посвящены работы [14–19], однако в них в основном изучается выделение микропузырьков газа при уменьшении давления в системе углеводород — газ. В указанных работах рассмотрены случаи движения микропузырьков в потоке нефти, движения микропузырьков и свободного газа, разработана математическая модель процесса.

Экспериментальное исследование микропузырькового режима фильтрации в СССР началось в 50-х гг. XX в., однако количество работ, посвященных данной теме, невелико. Следует отметить работы Д. М. Толстого [19], Б. А. Сулейманова [20], Г. С. Степановой [1]. Исследованию поверхностных явлений, а также экспериментальному исследованию поверхностных явлений на границе раздела в системе углеводород — газ посвящено небольшое число работ, выполненных в последние годы [21–23].

Таким образом, исследования смешивающегося и микропузырькового режимов вытеснения нефти сверхкритическими флюидными системами являются очень актуальными: надежные экспериментальные данные об условиях перехода микропузырькового режима течения сверхкритических флюидных систем в смешивающийся режим в пористой среде при вытеснении из нее вязких и высоковязких нефтей в настоящее время отсутствуют. Решение поставленных задач позволит разработать математическую модель нестационарной неизотермической фильтрации вязкого многокомпонентного потока жидкость — сверхкритический флюид в широком диапазоне термобарических условий с учетом поверхностных явлений на границе между углеводородом и сверхкритическим флюидом.

Экспериментальный стенд для физического моделирования процесса смешивающейся и микропузырьковой фильтрации смеси нефть — сверхкритический CO_2 в однородной пористой среде. Экспериментальный стенд разработан в соответствии с требованиями к фильтрационным установкам, приведенными в [24, 25], и состоит из следующих систем: системы многофазной фильтрации и разделения фаз, системы насыщения модели пласта нефтью, системы создания, поддержания и измерения давления, системы термостатирования, системы создания оторочек сверхкритического углекислого газа и воды, системы задания и контроля расхода.

Экспериментальный стенд рассчитан на проведение исследований при значениях давления до 25 МПа и температуры до 473 К. Соответствие параметров во время проведения опытов реальным пластовым условиям достигается путем применения систем термостатирования экспериментальной ячейки, подготовки вытесняющего агента и системы создания, поддержания и измерения давления. В систему термостатирования входят девять хромель-капельных термопар, установленных по всей длине модели пласта с шагом 200 мм. Система создания, поддержания и измерения давления состоит из газового мембранного компрессора, накопительных баллонов, рабочего баллона, жидкостного насоса со встроенным датчиком давления, расходомера, манометров, установленных на входе в кернадержатель и выходе из него, а также ряда манометров, расположенных по всей длине экспериментальной ячейки на расстоянии 200 мм друг от друга. Рабочее давление диоксида углерода создается с помощью мембранного компрессора МК-80-3,5/350, откачивающего углекислый газ из накопительных баллонов в приемный баллон, из которого диоксид углерода подается в экспериментальную ячейку с помощью жидкостного насоса фирмы Waters (модель P-20), работающего в диапазоне давлений $5 \div 60$ МПа с расходом

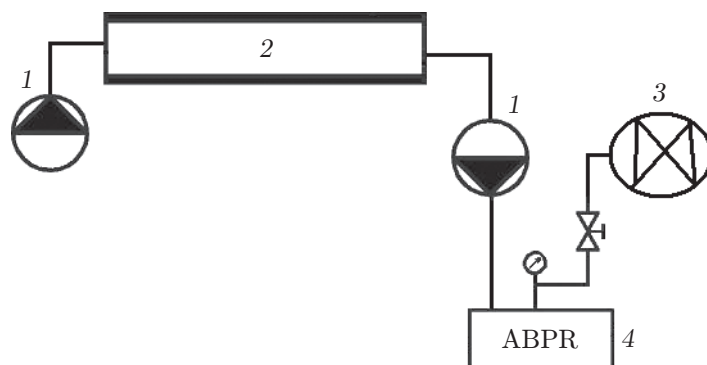


Рис. 1. Схема системы задания и контроля:

1 — массовый расходомер, 2 — экспериментальная ячейка, 3 — электромагнитный клапан, 4 — автоматический регулятор давления (ABPR)

0,01 ÷ 20,00 г/мин. Для измерения массового расхода закачиваемого углекислого газа с погрешностью не более 0,01 г/мин применяется расходомер Siemens. Контроль расхода диоксида углерода осуществляется с помощью системы задания и контроля расхода, состоящей из массового расходомера Siemens, устанавливаемого на выходе из баллона и на входе в модель пласта, автоматического обратного регулятора давления (ABPR) фирмы Waters и электромагнитных клапанов. Обратный регулятор давления и электромагнитные клапаны устанавливаются на выходе из модели пласта и подключаются к компьютеру. Схема системы задания и контроля расхода приведена на рис. 1. В схеме экспериментальной установки предусмотрен компьютер, который управляет заданием расхода насоса, устанавливает необходимое давление на обратном регуляторе давления и в соответствии с заданным значением расхода углекислого газа регулирует величину открытия электромагнитных клапанов. Расход углекислого газа при температурах 313 и 333 К составляет $1,6 \cdot 10^{-5}$ и $2,16 \cdot 10^{-5}$ кг/с соответственно.

Подготовка к проведению эксперимента предусматривает определение значения пористости и проницаемости пористой среды экспериментальной ячейки в соответствии с ОСТ 39-195-86 и включает следующие операции: измерение градиента давления в течение всего времени проведения эксперимента и времени до прорыва углекислого газа из пласта, а также измерение температуры выходящего из экспериментальной ячейки углекислого газа.

Оригинальным узлом, разработанным авторами данной работы, является система многофазной фильтрации и разделения фаз, состоящая из экспериментальной ячейки, устройства разделения фаз, приемной емкости газов и сосуда для сбора нефти. Приемная емкость газов представляет собой баллон объемом 10 л и предназначена для сбора углекислого газа на выходе из устройства для разделения фаз.

Экспериментальная ячейка (рис. 2), выполненная в соответствии с требованиями, предъявляемыми к сосудам высокого давления [26], заполняется пористой средой (кварцевым песком) и насыщается нефтью или модельной нефтью. Экспериментальная ячейка является физической моделью нефтяного пласта, позволяющей исследовать процесс смешивающейся или микропузырьковой фильтрации сверхкритического CO_2 при вытеснении им нефти из пористой среды. Для поддержания постоянной температуры во время проведения опытов на внешнюю поверхность корпуса ячейки плотно намотан нагревательный кабель марки КНМСНХ-Н.

Выход микропузырьков из экспериментальной ячейки контролируется с использованием специально разработанного устройства для разделения фаз (сепаратора), схема которого представлена на рис. 3. Внутри сепаратора установлена термopapa, что позволяет

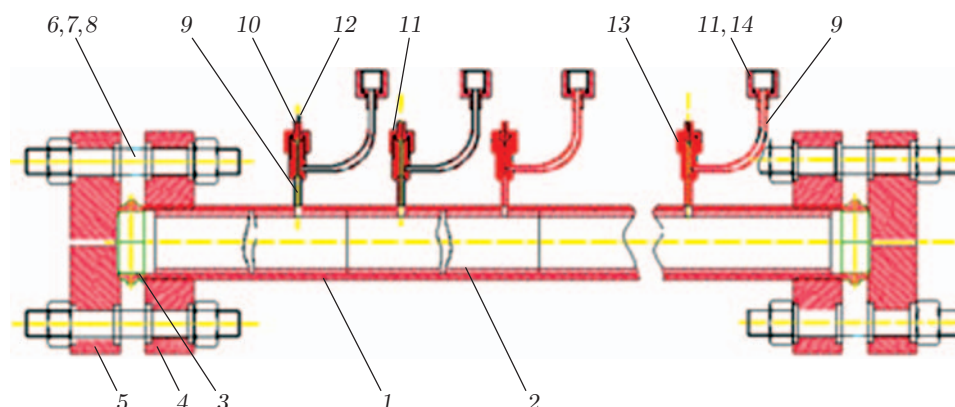


Рис. 2. Схема экспериментальной ячейки:

1 — корпус аппарата, 2 — отрезки труб, 3 — линзовое уплотнение, 4 — резьбовой фланец, 5 — ответный фланец, 6 — шпилька, 7 — гайка, 8 — шайба, 9 — соединительная трубка, 10 — ниппель, 11 — накидная гайка, 12 — термопара, 13 — штуцер, 14 — «грибок»

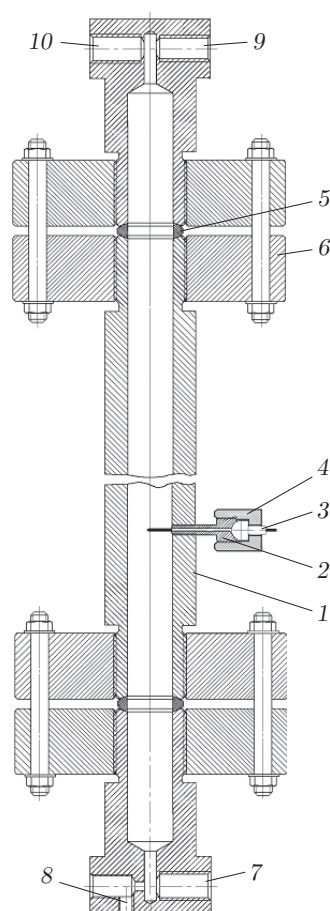


Рис. 3. Схема устройства для разделения фаз:

1 — корпус аппарата, 2 — штуцер, 3 — хромель-алюмелевая термопара, 4 — накидная гайка, 5 — линзовое уплотнение, 6 — фланец, 7 — отверстие для отвода нефти, 8 — заглушка, 9 — отверстие для подачи смеси, 10 — отверстие для отвода углекислого газа

измерять температуру выходящего из пласта углекислого газа, также к сепаратору присоединен манометр для измерения давления внутри.

Устройство позволяет разделить поток нефть — сверхкритический CO_2 на компоненты: диоксид углерода и нефть. Выходящий из экспериментальной ячейки поток подается в верхнюю часть устройства.

Методика эксперимента. В ходе закачки диоксида углерода в экспериментальную ячейку осуществляется процесс фильтрации смеси углеводород — CO_2 и вытеснение нефти (модельной нефти) в сосуд для сбора нефти. Величина падения давления при длине пласта, равной 2 м, составляет не более 0,05 МПа. Объем вытесненной нефти зависит от режима ее вытеснения сверхкритическим CO_2 . В ходе эксперимента отмечено два принципиально различающихся режима прорыва диоксида углерода из экспериментальной ячейки. Момент и характер прорыва углекислого газа фиксировался с помощью устройства для разделения фаз. В ходе экспериментов по вытеснению трансформаторного масла сверхкритическим CO_2 при давлении 12 МПа и более промерзания верхней части устройства и уменьшения температуры углекислого газа, измеряемой с помощью хромель-алюмелевой термопары, не происходило в течение всего времени проведения эксперимента (24 ч и более). При этом в момент прорыва углекислого газа отмечался очень громкий хлопок, верхняя часть устройства замерзала, определяемая термопарой температура внутри него падала, а давление внутри модели пласта уменьшалось по всей его длине и в дальнейшем не восстанавливалось. Причем уменьшение давления внутри модели пласта наблюдалось на всех девяти манометрах, установленных по всей длине пласта.

Иная картина наблюдалась при вытеснении трансформаторного масла сверхкритическим диоксидом углерода при давлениях ниже 12 МПа и температуре 313 К (рис. 4).

Коэффициент вытеснения нефти определяется из соотношения

$$\eta = M_2/M_1,$$

где M_2 — масса нефти, вытесняемой из экспериментальной ячейки с пористой средой; M_1 — первоначальная масса нефти в экспериментальной ячейке. Погрешность определения коэффициента вытеснения нефти не превышает 6,2 %.

При несмешивающемся вытеснении реализуется микропузырьковый режим фильтрации газов и сверхкритических флюидных систем, который характеризуется повышенными значениями градиента давления по длине экспериментальной ячейки: при длине пласта, равной 2 м, градиент давления увеличивается до значений 0,03 ÷ 0,04 МПа вследствие

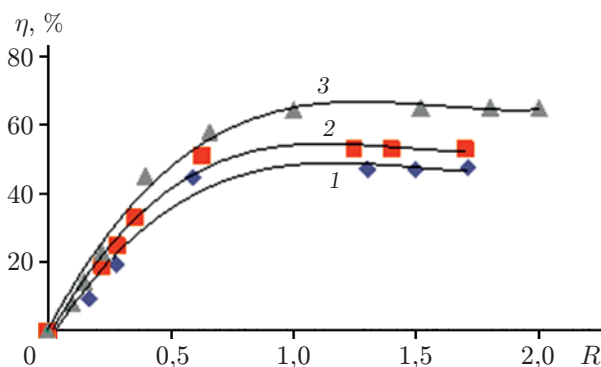


Рис. 4. Зависимость коэффициента вытеснения нефти с вязкостью $\mu = 38 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ сверхкритическим CO_2 из экспериментальной ячейки с пористой средой от порового объема R при температуре 313 К и различных значениях давления: 1 — $P = 8 \text{ МПа}$, 2 — $P = 10 \text{ МПа}$, 3 — $P = 12 \text{ МПа}$

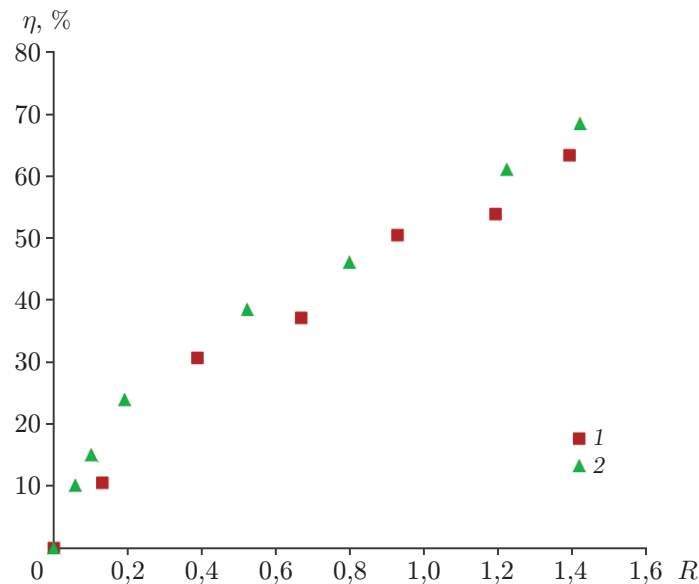


Рис. 5. Зависимость коэффициента вытеснения нефти с вязкостью $\mu = 38 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ оторочками сверхкритического CO_2 и воды от объема закачки при температуре 313 К и различных значениях давления:
1 — $P = 8 \text{ МПа}$, 2 — $P = 10 \text{ МПа}$

появления в пористой среде границы раздела фаз трансформаторное масло — CO_2 . При $P = 8 \div 12 \text{ МПа}$ расход диоксида углерода составлял $2,0 \cdot 10^{-5} \div 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$.

Фильтрация диоксида углерода внутри пористой среды сопровождается его прорывами из пласта в устройство для разделения фаз. Визуальное наблюдение показало, что в этом случае имеет место обледенение верхней части устройства. В отличие от опытов с керосином снижение температуры потока и обледенение устройств было кратковременным, не более 5–8 с, давление внутри ячейки также снижалось кратковременно, а через 5–8 с восстанавливалось до давления в эксперименте.

В микропузырьковом режиме коэффициент вытеснения нефти принимает меньшие значения, чем в смешивающемся (см. рис. 4): при давлении $P < 12 \text{ МПа}$ происходит “расслоение” экспериментальных кривых, при $P = 8, 10 \text{ МПа}$ значения коэффициента вытеснения нефти существенно отличаются от значений коэффициента вытеснения нефти при давлении 12 МПа. Вследствие этого в области микропузырькового вытеснения нефти сверхкритическим CO_2 предлагается использовать закачку оторочек сверхкритического CO_2 и воды. Результаты исследований по закачке оторочек сверхкритического CO_2 и воды при температуре 313 К представлены на рис. 5.

Закачка оторочек проводится для того, чтобы не только увеличить коэффициент вытеснения нефти, но и снизить расход углекислого газа. Однако увеличение объема закачиваемой воды и уменьшение объема закачиваемого газа оказывает негативное влияние на процесс вытеснения нефти. Поэтому в настоящей работе сначала закачивается диоксид углерода, затем вода. Объемы закачиваемых оторочки углекислого газа и оторочки воды приняты равными 0,25 поровых объемов. Количество циклов принято равным трем. Расход диоксида углерода при температуре 313 К составлял $2,0 \cdot 10^{-5} \div 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$, расход воды — $1,8 \cdot 10^{-5}$ и $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$. Такой подход позволил сократить расход углекислого газа до 50 % по сравнению со случаем закачки чистого сверхкритического CO_2 . Время закачки необходимого объема углекислого газа подбиралось экспериментально.

Результаты исследований показали, что применение оторочек сверхкритического CO_2 и воды позволяет существенно увеличить коэффициент вытеснения нефти в области образования микропузырьков. В случае микропузырькового режима фильтрации при растворении сверхкритического CO_2 в нефти ее динамическая вязкость уменьшается, а при растворении в воде вязкость воды увеличивается. Вследствие этого вязкости вытесняющего и вытесняемого агентов становятся близкими, что приводит к выравниванию фронта вытеснения. Можно предположить, что при вытеснении нефти с окклюдированными микропузырьками углекислого газа вода действует как буфер для не растворенных в нефти микропузырьков сверхкритического CO_2 , однако это требует проведения дополнительных исследований.

Заключение. Разработан экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования процесса вытеснения нефти различной вязкости из однородного насыпного пласта с использованием сверхкритических флюидных систем при различных режимах фильтрации.

Получены новые экспериментальные данные о коэффициенте вытеснения нефти сверхкритическим CO_2 и оторочками сверхкритического CO_2 и воды из однородной насыпной пористой среды в режиме микропузырьковой фильтрации сверхкритического диоксида углерода.

Установлено, что в микропузырьковом режиме фильтрации сверхкритического CO_2 нефтеотдача ниже, чем в смешивающемся режиме.

Для увеличения нефтеотдачи в микропузырьковом режиме вытеснения нефти сверхкритическим CO_2 предложено и обосновано экспериментально применение оторочек сверхкритического CO_2 и воды, что позволяет увеличить коэффициент вытеснения нефти в микропузырьковой области фильтрации CO_2 на 10–11 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Степанова Г. С.** Газовые и водогазовые методы воздействия на нефтяные пласты. М.: Газойл пресс, 2006.
2. **Сургучев М. Л.** Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1985.
3. **Мамедов Э. А., Сальников А. М.** Структура остаточных запасов нефти и газа на истощенных месторождениях // Нефтепромысловое дело. 2016. № 6. С. 6–7.
4. **Aleidan A. A. S.** Experimental and simulation studies to evaluate the improvement of oil recovery by different modes of CO_2 injection in carbonate reservoirs: PhD thesis. Texas: Texas A&M Univ., 2010.
5. **Dayanand S.** Characterization and determination of CO_2 -reservoir oil miscibility // CO_2 -reservoir oil miscibility. Long Beach: California State Univ., 2019. P. 19–36.
6. **Зацепин В. В.** Опыт промышленной реализации технологии водогазового воздействия с закачкой водогазовой смеси в пласт // Нефтепромысловое дело. 2007. № 1. С. 8–10.
7. **Лысенко В. Д.** Проблемы разработки залежи нефти при газовом заводнении и чередующейся закачке воды и газа // Нефтепромысловое дело. 2007. № 2. С. 4–15.
8. **Al-Netaifi A. S.** Experimental investigation of CO_2 — miscible oil recovery at different conditions: PhD. Rajb, 2008.
9. **Рассохин С. Г., Троицкий В. М., Мизин А. В., Рассохин А. С.** Моделирование водогазового воздействия на низкопроницаемый нефтяной пласт // Газовая пром-сть. 2009. № 5. С. 40–44.
10. **Баллинт В.** Применение углекислого газа в добыче нефти. М.: Недра, 1977.

11. Хлебников В. Н., Губанов В. Б., Полищук А. М. Использование слим-моделей пласта (slim tube) для физического моделирования процессов вытеснения нефти смешивающимися агентами. Ч. 2. Оценка возможности применения стандартного фильтрационного оборудования для осуществления слим-методики // Нефтепромысловое дело. 2014. № 6. С. 32–38.
12. Волков В. А., Прохоров П. Э., Турапин А. Н. Газоциклическая закачка диоксида углерода в добывающие скважины для интенсификации добычи высоковязкой нефти // Нефть. Газ. Новации. 2017. № 4. С. 62–68.
13. Волков В. А., Прохоров П. Э., Турапин А. Н. Технологические аспекты реализации газоциклической закачки диоксида углерода для увеличения добычи высоковязких нефтей // Нефть. Газ. Новации. 2018. № 8. С. 20–25.
14. Степанова Г. С. О влиянии адсорбции-десорбции микроразорышей газа на характер фильтрации газированной жидкости // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2003. № 5. С. 106–114.
15. Ren B., Xu Y., Niu B. Laboratory assessment and field pilot of near miscible CO₂ injection for IOR and storage in a tight oil reservoir of Shengli Oilfield China // Proc. of the Enhanced oil recovery conf., Kuala Lumpur (Malaysia), July 2011. S. 1., 2011. DOI: 10.2118/144108-MS.
16. Zuo L., Benson S. Water conformance and mobility control by CO₂ exsolution // Proc. of the Collaborative symp. on CO₂ EOR between universities in Texas and Norway, Houston (USA), 19–21 Nov. 2013. Stanford: Stanford Univ., 2013. P. 148–160.
17. Михайлов Д. Н. Особенности процесса вытеснения нефти при наличии микропузырьков газа в фильтрационном потоке // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 3. С. 68–83.
18. Кутрунов В. Н. Математическая модель процесса вытеснения нефти водогазовой смесью // Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1, № 2. С. 163–172.
19. Толстой Д. М. Молекулярная теория скольжения жидкостей по твердым поверхностям // Докл. АН СССР. 1952. Т. 85. С. 1089–1092.
20. Сулейманов Б. А. Особенности фильтрации гетерогенных систем. М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2007.
21. Лян Мен. Физическое моделирование вытеснения нефти газом (растворителем) с использованием керновых моделей пласта и slim tube: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2016.
22. Ямалетдинова К. Ш. Разработка научных основ и способов освоения трудноизвлекаемых запасов нефти в режиме смешивающегося вытеснения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Уфа: Изд-во Башкир. гос. ун-та, 2006.
23. Хиразов Э. Р. Экспериментальное исследование капиллярных явлений при смешивающемся вытеснении нефти: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Ин-т проблем трансп. энергоресурсов, 2008.
24. Розенберг М. Д. Многофазная многокомпонентная фильтрация при добыче нефти и газа / М. Д. Розенберг, С. А. Кундин. М.: Недра, 1976.
25. Эфрос Д. А. Исследования фильтрации неоднородных систем. Л.: Гостоптехиздат. Ленингр. отд-ние, 1963.
26. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты высокого давления. Нормы и методы расчета на прочность. Введ. 18.05.1989. М.: Стандартиформ, 1989.

*Поступила в редакцию 21/VII 2020 г.,
после доработки — 12/II 2021 г.
Принята к публикации 29/III 2021 г.*