



ISSN: 2658–5782

Номер 1

2021

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Влияние физических параметров на структуру «вязких пальцев»¹

Валиев А.А., Низамова А.Д., Ахметов А.Т.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Вытеснение нефти менее вязкими средами приводит к неустойчивости фронта и образованию «вязких пальцев». Наиболее информативно динамику изменения границы раздела между нагнетаемым флюидом и вытесняемой средой при изменении физических параметров можно изучить с помощью ячейки Хеле-Шоу. Использование ячейки с малым зазором позволяет отследить влияние изменения поверхностного натяжения (на границе раздела вытесняющая жидкость – нефть) на процесс формирования «вязких пальцев». Представлены результаты экспериментального исследования развития «вязких пальцев» при неустойчивом вытеснении нефти водой и водным раствором ПАВ из ячейки Хеле-Шоу. Изменялись следующие физические параметры: температура, динамическая вязкость, поверхностное натяжение и режимы течения, влияющие на формирование «вязких пальцев». Установлено, что увеличение расхода вытесняющей жидкости приводит к росту площади охвата и уменьшению ширины «вязких пальцев». После прорыва наблюдается падение доли вытесненной нефти. Использование ПАВ уменьшает поверхностное натяжение на границе двух сред, увеличивает охват и существенно снижает число и размер остаточных целиков нефти, это приводит к увеличению эффективности вытеснения. Увеличение температуры уменьшает отношение вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей, что приводит к менее интенсивному развитию «языков» и более эффективному вытеснению нефти. Фрактальный анализ размерностей «вязких пальцев» позволил установить корреляцию фрактальной размерности с эффективностью вытеснения – увеличение фрактальной размерности соответствует росту нефтеизвлечения. Таким образом, изменение физических параметров при неустойчивом вытеснении позволяет найти определяющие факторы для увеличения нефтеизвлечения на различных стадиях вытеснения.

Ключевые слова: неустойчивое вытеснение, ячейка Хеле-Шоу, «вязкие пальцы», фракталы, поверхностное натяжение, объемный расход, нефтеизвлечение

1. Введение

Вытеснение нефти менее вязкими средами приводит к неустойчивости фронта и образованию «вязких пальцев» (см. [1]). Наиболее информативно динамику изменения границы раздела между нагнетаемым флюидом и вытесняемой средой при изменении физических параметров можно изучить с помощью ячейки Хеле-Шоу. Использование

ячейки с малым зазором позволяет отследить влияние изменения поверхностного натяжения σ (на границе раздела вытесняющая жидкость – нефть) на процесс формирования «вязких пальцев». Проведение экспериментов при различных температурах T дает возможность эффективно менять соотношение динамических вязкостей (нефти μ_H /воды μ_B и нефти μ_H /раствор ПАВ μ_P) изучаемых сред. Регулируя нагнетание флюидов с постоянным объемным расходом Q можно изучить динамику развития фронта при различных режимах вытеснения.

На цилиндрической извивающейся границе раздела жидкостей капиллярное давление определяется двумя главными кривизнами поверхности раздела. Одна соответствует кривизнам изгибаю-

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-80008-мол_эв_а.

щейся линии фронта; другая, при полном смачивании, — половине величины зазора (10 мкм). Рост основного «вязкого пальца» («языка») преобладает в направлении наибольшего градиента давления. Капиллярные силы выпуклой части фронта оказывают тормозящее действие, вогнутой — ускоряющее, но их стабилизирующее действие намного меньше гидродинамических сил, приводящих к развитию «пальцев» [2]. Капиллярные силы, обусловленные взаимодействием с поверхностью при огромной кривизне, весьма значительны, они играют основную роль в образовании остаточных целиков вытесняемой жидкости.

В процессе неустойчивого вытеснения нефти водой можно выделить два этапа — течение до прорыва (подход «языка» к выходному отверстию) и после прорыва. Образующиеся структуры «вязких пальцев» до прорыва формируют фрактальные структуры, которые являются начальными для структур, образующихся в процессе последующего вытеснения. Для практического использования, в частности, для оценки эффективности вытеснения, крайне важны процессы, влияющие на расширение зоны вытеснения и происходящие после прорыва. Изменение температуры и концентрации растворов ПАВ дает возможность менять соотношения вязкостей между вытесняемой и вытесняющей жидкостями и поверхностное натяжение на границе раздела фаз.

2. Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились на ячейке Хеле-Шоу, представляющей собой плоский канал размером $3,5 \times 2$ см, глубиной 20 мкм между двумя оптическими пластинами толщиной 2 см с поровым объемом $V_0 = 14$ мкл. Расход жидкости задавался шприцевым насосом, дополнительно контролировался весовым методом, давление измерялось манометром и датчиком давления (MPX 5100). Для предотвращения размытости картины съемка проводилась с минимальной выдержкой видеокамеры. На компьютере осуществлялся видеозахват кадров изображения течения, а также синхронизировались и записывались измерения датчика давления и прецизионных весов [3]. Полученные видеозаписи обрабатывались в программе ImageJ. Высокое качество изображений позволило получить качественные бинарные картины и рассчитать остаточную насыщенность вытесняемой фазы. Поскольку последовательные структуры «вязких пальцев» обладают самоподобием, был проведен их фрактальный анализ [4]. Расчет фрактальной размерности D вытесняющей фазы проводился в программе NarFa

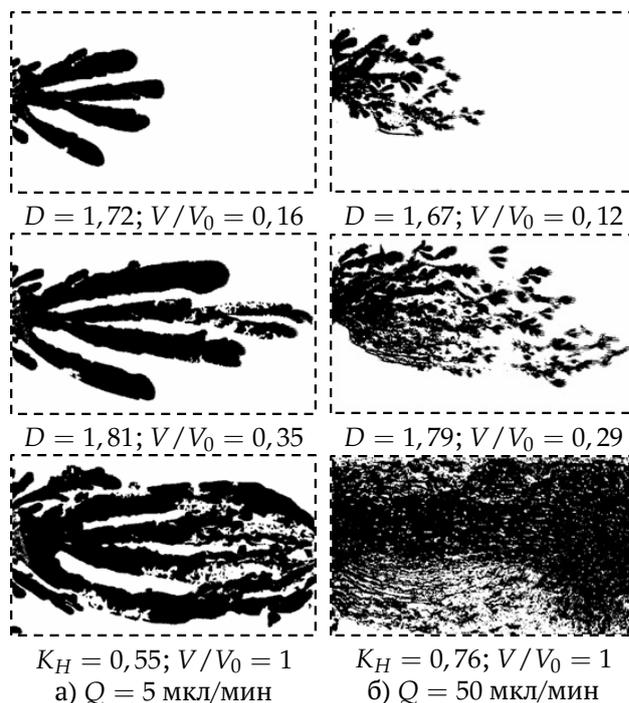


Рис. 1. Кадры видеозаписи неустойчивого вытеснения нефти водой в бинарном виде для двух режимов нагнетания при постоянных объемных расходах $Q = 5$ мкл/мин (а), $Q = 50$ мкл/мин (б), $T = 25$ °С, $\mu_H/\mu_B = 29$, $\sigma = 30$ мН/м (штриховые линии соответствуют контуру ячейки Хеле-Шоу; видеокадры сверху вниз демонстрируют структуру развития «вязких пальцев» и их состояние при достижении середины ячейки, выходного отверстия и после прокачки одного объема ячейки)

5.5L с использованием метода «box-counting».

3. Результаты экспериментов

По данным реологических измерений, проведенных на прецизионном ротационном реометре HAAKE MARS III при 25 °С, соотношение вязкостей $\mu_H/\mu_B = 29$. Нагнетание дистиллированной воды при расходе 5 мкл/мин в ячейку, заполненную нефтью, приводит к формированию узкого «языка» (рис. 1(а)) с разветвлениями, направленными в сторону градиента давления с охватом не больше половины ширины канала. Объем вытесненной нефти при подходе фронта к центру ячейки составляет $0,16V_0$, при достижении «вязкими пальцами» выходного отверстия (прорыва) — $0,35V_0$. После прорыва происходит резкое оживление боковых пальцев, сопровождаемое расширением площади охвата с большим количеством небольших «островков» из остаточных целиков нефти. Прокачка одного порового объема воды приводит к вытеснению

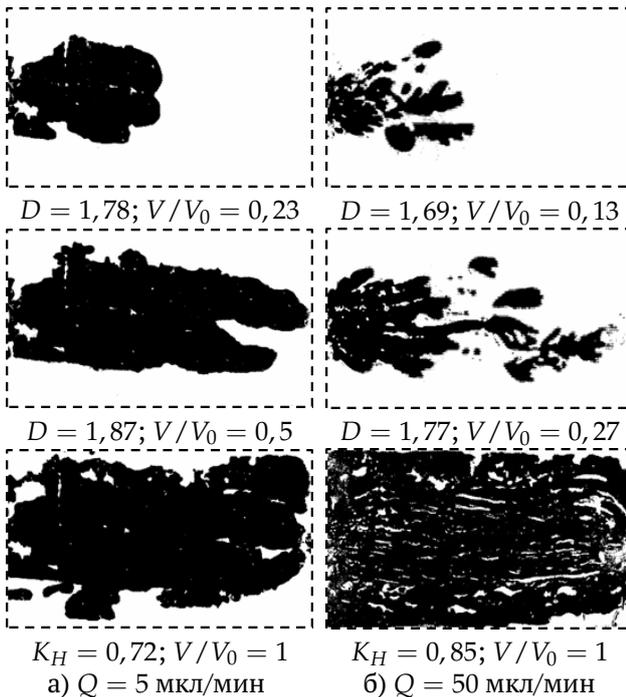


Рис. 2. Кадры видеозаписи неустойчивого вытеснения нефти водой в бинарном виде для двух режимов нагнетания при постоянных объемных расходах $Q = 5$ мкл/мин (а), $Q = 50$ мкл/мин (б), $T = 80$ °С, $\sigma = 27$ мН/м, $\mu_H/\mu_B = 9$ (штриховые линии соответствуют контуру ячейки Хеле-Шоу; видеокадры сверху-вниз демонстрируют структуру развития «вязких пальцев» и их состояние при достижении середины ячейки, выходного отверстия и после прокачки одного объема ячейки)

более половины начального объема нефти $0,55V_0$ с коэффициентом нефтеизвлечения $K_H = 0,55$. При 10-кратном увеличении расхода до 50 мкл/мин картина вытеснения существенно изменяется: если при 5 мкл/мин «пальцы» широкие, гладкие и относительно мало дробятся, то при 50 мкл/мин «пальцы» быстро растут и практически сразу начинают дробиться с более широким охватом зоны вытеснения при достижении ими середины ячейки $K_H = 0,12$. Перед моментом наступления прорыва коэффициент нефтеизвлечения $K_H = 0,29$ немного ниже значения, полученного при малом расходе, но после прорыва и прокачки одного объема ячейки воды V_0 количество вытесненной нефти в 1,5 раза превышает количество, полученное при закачке с 10-кратно меньшим расходом.

Увеличение температуры от 25 °С до 80 °С приводит к уменьшению вязкости нефти в 8 раз, воды в 2,5 раза, соответственно отношение вязкостей

становится меньше в 3 раза — $\mu_H/\mu_B = 9$. Следует отметить, что с изменением температуры меняется и поверхностное натяжение на границе нефти с водой, но не столь значительно — в рассматриваемом диапазоне температур изменение не превышает 7%. Существенное изменение соотношения вязкостей приводит к уменьшению неустойчивости течения, расширению «вязких пальцев» и увеличению охвата почти на всю ширину ячейки при расходе 5 мкл/мин (рис. 2(а)), к большему нефтеизвлечению при достижении центра ячейки $K_H = 0,23$, а к моменту прорыва $K_H = 0,5$ практически без образования остаточных целиков нефти. Соответственно происходит увеличение объема вытесненной нефти и рост времени до наступления прорыва, после прорыва вытеснение идет с малым количеством остаточных целиков нефти. Нефтеизвлечение после прохождения одного объема пор воды $K_H = 0,72$.

Увеличение объемного расхода воды в 10 раз приводит к дроблению «вязких пальцев» и менее эффективному вытеснению нефти на начальной стадии продвижения «вязких пальцев» (рис. 2(б)) по сравнению с расходом 5 мкл/мин. Подобное поведение «вязких пальцев» продолжается вплоть до прорыва. При этом извлечение нефти $K_H = 0,27$ почти вдвое меньше значения при малом расходе $K_H = 0,5$ (рис. 2(а)). В стадии доотмыва вытеснение нефти идет бурно и ее извлечение после прохождения порового объема воды составляет $0,85V_0$, по сравнению с малым расходом извлечение нефти возрастает почти на 20%.

Вытеснение нефти 1% водным раствором ПАВ (додецилсульфат натрия — SDS) при более чем 10-кратном уменьшении поверхностного натяжения $\sigma = 3$ мН/м облегчает дробление пальцев и зарождение новых (рис. 3(а)). Образуется серия параллельных «вязких пальцев» с широким охватом. Объем вытеснения нефти на момент прорыва — $0,28V_0$. После прорыва все «вязкие пальцы» развиваются в ширину и охватывают весь канал, эффективность высока, а объем вытеснения нефти составляет $0,75V_0$. По сравнению с чистой водой использование 1% раствора ПАВ приводит к вытеснению нефти на 36% больше. В основном остаточные целики нефти имеют продолговатую вытянутую форму и, что примечательно, их движение не останавливается, а капиллярные силы меньше гидродинамических.

Десятикратное увеличение расхода приводит к вытянутой форме «вязких пальцев», т.е. к увеличению вытеснения нефти к моменту прорыва практически на треть. Довытеснение нефти происходит более активно по сравнению со все-

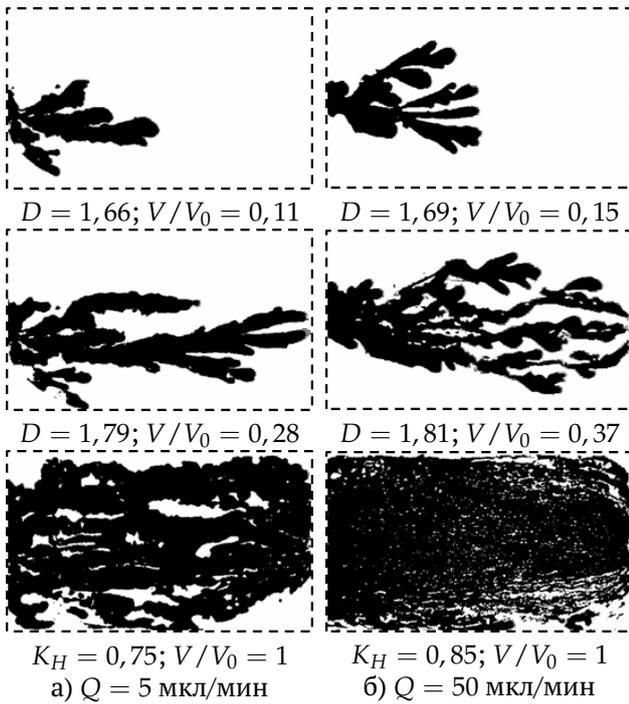


Рис. 3. Кадры видеозаписи неустойчивого вытеснения нефти раствором ПАВ в бинарном виде для двух режимов нагнетания при постоянных объемных расходах $Q = 5$ мкл/мин (а), $Q = 50$ мкл/мин (б), $\sigma = 3$ мН/м, $T = 25$ °С, $\mu_H/\mu_P = 31$ (штриховые линии соответствуют контуру ячейки Хеле-Шоу; видеокadres сверху-вниз демонстрируют структуру развития «вязких пальцев» и их состояние при достижении середины ячейки, выходного отверстия и после прокачки одного объема ячейки)

ми рассмотренными выше случаями, оставшиеся целики нефти продолжают движение. Довольно странно, что при большом объемном расходе эффективность раствора ПАВ почти такая же, как у дистиллированной воды.

При движении жидкости объем вытесненной нефти равен объему закачанной жидкости вплоть до прорыва (рис. 4). На графике представлены зависимости вытесненной нефти от объема закачанной жидкости, все значения объемов вытесненной нефти лежат на одной линии до момента прорыва. Но, тем не менее, в зависимости от структуры кластеров из «вязких пальцев» объемы вытесненной нефти к моменту прорыва существенно отличаются. Уменьшение отношения вязкостей μ_H/μ_B с 29 мПа·с до 9 мПа·с значительно стабилизирует фронт и приводит к вытеснению половины объема нефти. Наибольшее нефтеизвлечение после прокачки одного объема пор V_0 вытесняющей жидкости достигается при 10-кратном увеличении рас-

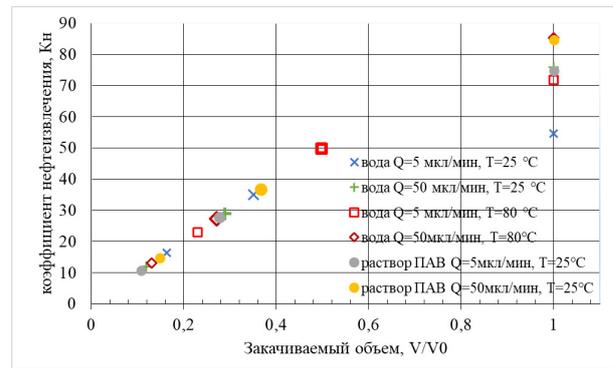


Рис. 4. Зависимость коэффициента нефтеизвлечения K_H от количества закачанного относительного объема жидкости (V/V_0)

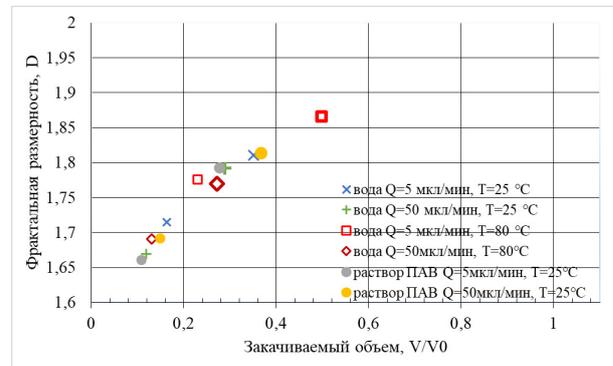


Рис. 5. Зависимость фрактальной размерности D от закачанного объема жидкости в ячейку Хеле-Шоу. Размерность приведена для «вязких пальцев» с учетом границы раздела фаз

хода со сниженным отношением вязкостей μ_2/μ_1 за счет температуры (рис. 2(б)) или использования ПАВ (рис. 3(б)) (две совпадающие верхние точки на рис. 4). В то время как до момента прорыва к наиболее эффективному вытеснению приводит снижение отношений вязкостей (рис. 2(а)).

Отличие структур «вязких пальцев» при постоянных расходах сказывается и в различии их фрактальных размерностей (рис. 5). Фрактальная размерность в зависимости от нагнетаемого объема во всех приведенных случаях растет. С увеличением размеров кластеров рост их фрактальной размерности замедляется.

Фрактальный анализ размерностей «вязких пальцев» отражает эффективность вытеснения: увеличение фрактальной размерности соответствует росту площади охвата.

4. Заключение

При неустойчивом вытеснении нефти в ячейке Хеле-Шоу изменение физических параметров приводит к существенному преобразованию структуры фронта, большому различию характера вытеснения до прорыва и после — при доотмыве. Эффективность нефтеизвлечения на всех стадиях вытеснения меняется в зависимости от физических параметров.

К моменту наступления прорыва наиболее значительные изменения в эффективности вытеснения происходят за счет уменьшения соотношений вязкостей (в 9 раз) при малом объемном расходе (5 мкл/мин) вытесняющей воды.

В стадии доотмыва наиболее эффективно использование большого расхода на ряду с уменьшением отношения вязкостей и поверхностного натяжения.

Таким образом, изменение физических параметров при неустойчивом вытеснении позволяет найти определяющие факторы для увеличения нефтеизвлечения на различных стадиях вытеснения.

Список литературы

- [1] Saffman P.G., Taylor G. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society. 1958. V. 245, No. 1242. Pp. 312–329.
[DOI: 10.1098/rspa.1958.0085](https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0085)
- [2] Homsy G.M. Viscous fingering in porous media // Annual review of fluid mechanics. 1987. V. 19, No. 1. Pp. 271–311.
- [3] 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](https://doi.org/10.17223/19988621/65/5)
- [4] Мавлетов М.В., Валиев А.А. Эффективность неустойчивого вытеснения нефти из ячейки Хеле-Шоу // Нефтегазовое дело. 2018. № 8. С. 42–45.
[DOI: 10.30713/0207-2351-2018-8-42-45](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2018-8-42-45)
- [5] Низамова А.Д., Валиев А.А. Математическая модель вытеснения нефти водой в плоском канале // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 3–4. С. 208–211.
[DOI: 10.21662/mfs2020.3.131](https://doi.org/10.21662/mfs2020.3.131)
- [6] Валиев А.А., Низамова А.Д. Комплексное исследование вытеснения нефти водой в плоском канале // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 1–2. С. 25.
[DOI: 10.21662/mfs2020.1.023](https://doi.org/10.21662/mfs2020.1.023)



Influence of physical parameters on the “viscous fingers” structure

Valiev A.A., Nizamova A.D., Ahmetov A.T.

Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa, Russia

Displacement of oil by less viscous media leads to instability of the front and the formation of “viscous fingers”, the structure of which depends on various physical parameters. The most informative dynamics of the change in the interface between the injected fluid and the displaced medium with a change in physical parameters can be studied using the Hele-Shaw cell. The use of a cell with a small gap makes it possible to track the effect of changes in surface tension (at the interface, oil displacing liquid) on the formation of “viscous fingers”.

The results of an experimental study of the development of “viscous fingers” during unstable displacement of oil by water and an aqueous solution of surfactants from the Hele-Shaw cell are presented. Physical parameters were changed: temperature, dynamic viscosity, surface tension and flow regimes influencing the formation of “viscous fingers”. It was found that an increase in the displacement fluid flow rate leads to an increase in the area of coverage and a decrease in the width of the “viscous fingers”. After the breakthrough, a drop in the share of oil displacement is observed. The use of surfactants reduces the surface tension at the interface between the two media, increases the coverage and significantly reduces the number and size of residual oil pillars, which leads to an increase in displacement efficiency. An increase in temperature decreases the viscosity ratio of the displaced and displaced fluid, which leads to less intensive tongue development and more efficient oil displacement.

Fractal analysis of the dimensions of «viscous fingers» made it possible to establish a correlation between fractal dimension and displacement efficiency, an increase in fractal dimension corresponds to an increase in oil recovery. Thus, the change in physical parameters during unstable displacement makes it possible to find the determining factors for increasing oil recovery at various stages of displacement.

Keywords: unstable displacement, Hele-Shaw cell, “viscous fingers”, fractals, surface tension, volumetric flow rate, oil recovery

References

- [1] Saffman P.G., Taylor G. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society. 1958. V. 245, No. 1242. Pp. 312–329.
DOI: 10.1098/rspa.1958.0085
- [2] Homsy G.M. Viscous fingering in porous media // Annual review of fluid mechanics. 1987. V. 19, No. 1. Pp. 271–311.
- [3] Valiev A.A., Akhmetov A.T., Rakhimov A.A. Unstable displacement in a plane-parallel microchannel // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. 2020. № 65. Pp. 68–82. (In Russian)
DOI: 10.17223/19988621/65/5
- [4] Mavletov M.V., Valiev A.A. Efficiency of unstable oil displacement from the Hele-Shaw cell // Neftegazovoe delo. 2018. № 8. Pp. 42–45. (In Russian)
DOI: 10.30713/0207-2351-2018-8-42-45
- [5] Nizamova A.D., Valiev A.A. Mathematical model of oil displacement by water in a plane channel // Mnogofaznyie sistemyi. 2020. V. 15, № 3–4. Pp. 208–211. (In Russian)
DOI: 10.21662/mfs2020.3.131
- [6] Valiev A.A., Nizamova A.D. Comprehensive study of oil displacement by water in a plane channel // Mnogofaznyie sistemyi. 2020. V. 15, № 1–2. P. 25. (In Russian)
DOI: 10.21662/mfs2020.1.023