

Контактные явления при водоизоляции

О.Ф. Кондрашев

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия
E-mail: kondr_of@mail.ru

Аннотация. Микрореологические исследования в порах микронных размеров гелеобразующих растворов на основе гивпана показали, что контактное взаимодействие в пластовой системе жидкость–порода приводит к структурно-механической коагуляции пористой среды, блокированию поровых каналов упруговязкими пробками фильтрата, проявляющего в обычных условиях вязкопластичные качества. Показано, что эти процессы развиваются сразу при контакте фильтрата с поверхностью, а разрывы сплошности при критических давлениях не ухудшают водоизолирующих свойств.

Ключевые слова: граничный и адсорбционный слои, нелинейная фильтрация, сдвиговая упругость, контактное взаимодействие, разрыв сплошности.

Для цитирования: Кондрашев О.Ф. Контактные явления при водоизоляции // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. Вып. 1(40). С. 27–35. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-40.art3>

Введение

Высокая удельная поверхность горных пород, наличие природных и синтетических поверхностно-активных веществ в пластовых флюидах создают предпосылки для их интенсивного контактного взаимодействия и соответствующего влияния на фильтрационно-емкостные характеристики пластовых систем.

Первые упоминания о влиянии молекулярно-поверхностных взаимодействий в водопроницаемых грунтах относятся еще к XIX веку [1, с. 59]. Возникновение критического градиента давления связывалось как с капиллярными явлениями, ограничивающими спектр пор, охваченных фильтрацией [2], так и с образованием на их поверхности прочных пристенных слоев, снижающих проницаемость [3].

С началом промышленного освоения нефтяных месторождений аналогичные коллизии возникли и в отношении пластовых флюидов: Д. Льюис [4], например, установил связь проницаемости с природой фильтрата и

адсорбционным взаимодействием, а Х. Адзуми [5] и М. Маскет [6, с. 89] доказали обратное.

Только к середине прошлого века совершенствование техники и методики фильтрационных исследований позволило П.А. Ребиндеру и др. [7] убедительно доказать связь нелинейного характера фильтрации нефти с образованием адсорбционно-сольватных (далее граничных) слоев, снижающих эффективное сечение поровых каналов.

Его исследования, работы Б.В. Дерягина [8] положили начало интенсивному изучению морфологии этих слоев, представляющих собой двумерные структуры, существенно отличающиеся по плотности, оптическим, диэлектрическим и структурно-механическим свойствам от аналогичных объемных характеристик жидкости. Размеры граничных слоев по разным оценкам варьируют от десятков нанометров до десятков микрометров в зависимости от рода жидкости и контактной поверхности [9].

Прямое применение эти исследования нашли в теории и практике смазочного действия, где граничные слои обрели свое современное название [10].

В нефтяной отрасли это направление интенсивно разрабатывалось в Уфимском нефтяном институте (ныне Уфимский государственный нефтяной технический университет), где проф. И.Л. Мархасиным была создана уникальная экспериментальная база для исследования молекулярно-поверхностных взаимодействий в пластовых системах, нашедшая применение в решении многих вопросов добычи углеводородов – оценки эффективности воздействия физико-химических методов на остаточную нефть, гидродинамики фильтратов технологических жидкостей в пористой среде и т. п. [11].

Признанием важности и перспективности этих исследований было проведение на базе вуза двух всесоюзных конференций по физико-химической механике нефти и нефтепродуктов.

Однако после П.А. Ребиндера и Б.В. Дерягина интенсивность работ в этой области существенно снизилась [12–17], хотя применение новых материалов в добыче нефти, увеличение доли месторождений с осложненными условиями эксплуатации объективно требуют, напротив, усиленного изучения более сложных пластовых объектов.

В полной мере это относится к системам с растворами на полимерной основе, реология которых значительно сложнее низкомолекулярных жидкостей [18]. Разработка их проводится, как правило, на основе методов стандартной нефтяной реометрии, предназначенных для тестирования объемных свойств растворов предыдущего поколения и не ориентированных на изучение проявлений контактного взаимодействия – граничных слоев и различных вязкоупругих эффектов,

влияние которых на свойства фильтрата и его гидродинамику может быть определяющим [19].

Основная часть

Для проработки подобных вопросов были проведены дополнительные исследования новых образцов водоизолирующего состава [20] на экспериментальной установке, представляющей собой конструктивное развитие известных приборов Б.В. Дерягина и П.А. Ребиндера и предназначенной для изучения молекулярно-поверхностных явлений в пластовых системах жидкость–порода, анализа их влияния на физические характеристики флюидов в порах микронного масштаба.

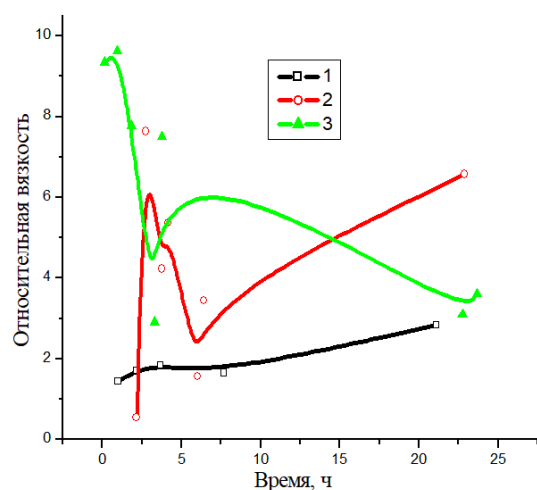
Измерительная ячейка установки (далее узкий зазор) представляет собой две параллельно расположенные пластины из породообразующего минерала, закрепленные в сложном механическом подвесе, который обеспечивает тангенциальность расположения пластин и расстояния между ними – узкого зазора в интервале 0,1–30 мкм [19]. Принципиальное отличие описываемого устройства от прототипов – прямое измерение структурно-механических свойств флюидов при пластовых условиях.

Объект исследования, подробно описанный в [20], представлял собой водощелочные растворы гидролизованного акрилсодержащего полимера с функциональной добавкой – гидрофобизатором. Полимер, выпускаемый под названием «гивпан», в отличие от гипана, более термостабилен, что принципиально важно для условий Западной Сибири. Гидрофобизатор – продукт реакции триэтаноламина с жирными кислотами таллового масла – относится к классу неионогенных поверхностно-активных веществ (НПАВ).

С учетом коллоидных свойств раствора и его компонентов (геле-, осадко- и мицеллообразование) были подготовлены несколько перспективных образцов водоизолирующего состава, содержащих до 3–10% гивпана, 0,5–15% НПАВ и 0–10% CaCl_2 .

Результаты исследований

В ходе микрореологических исследований в узких зазорах, соответствующих средним радиусам поровых каналов естественных кернов, были выявлены особенности контактного взаимодействия, определяющие гидродинамику водоизолирующего состава:



1 – гивпан; 2, 3 – раствор гивпана с НПАВ

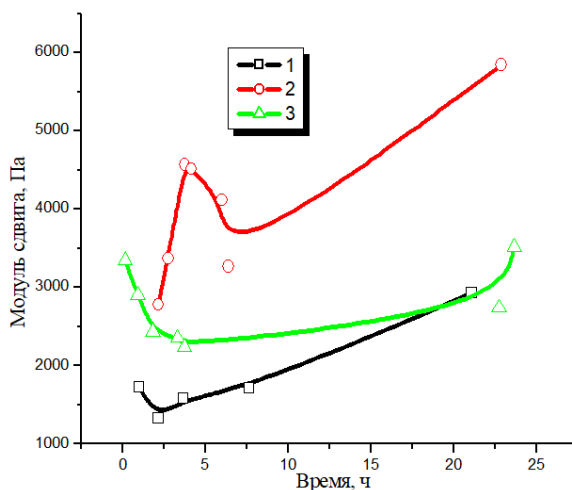
Рис. 1. Динамика вязких свойств гивпана и его раствора с НПАВ в узком зазоре 1,8 мкм (1, 2) и 3,6 мкм (3)

Анализ этой стадии структурообразования показал, что результат вызван стерическими эффектами – геометрией пор и поверхностными силами, ограничивающими подвижность кинетических элементов жидкости. Макроскопически это проявляется в виде резкого усиления неньютоновских

1. скачок вязкоупругих свойств в момент контакта;

2. селективное усиление неньютоновских свойств фильтрата.

Изучение динамики структурообразования полимерных растворов (рис. 1 и 2) показал, что эта зависимость имеет полиэкстремальный характер, где первый экстремум структурно-механических свойств наблюдается сразу в момент контакта с твердым телом. Вязкость при этомкратно превышает свое объемное значение – фактор приведения в данном случае, а появление сдвиговой упругости (см. рис. 2) говорит о качественном изменении надмолекулярной структуры жидкости.



1 – гивпан; 2, 3 – раствор гивпана с НПАВ

Рис. 2. Динамика упругих свойств гивпана и его раствора с НПАВ в узком зазоре 1,8 мкм (1, 2) и 3,6 мкм (3)

аномалий сразу при затекании фильтрата в пору. Из рассматриваемых кинетических зависимостей видно, что эта первичная квазиструктура быстрее формируется в случае ослабления указанных факторов – увеличения узкого зазора или наличия НПАВ (см. рис. 1 и 2, кривые 1, 3).

Дальнейшее немонотонное изменение динамической кривой в течение суток связано с массопереносом к границе раздела и формированием граничного слоя, постепенно структурирующего поровое пространство.

Корректность интерпретации этого механизма иллюстрирует кинетика фактора механических потерь (рис. 3), определяемого соотношением вязких и упругих свойств жидкости: уменьшение этого показателя говорит о преобладании упругих свойств в пробе жидкости и отражает процесс формирования граничного слоя, постепенно структурирующего поровую жидкость и изменяющего ее организацию от вязкопластичной до упруговязкой.

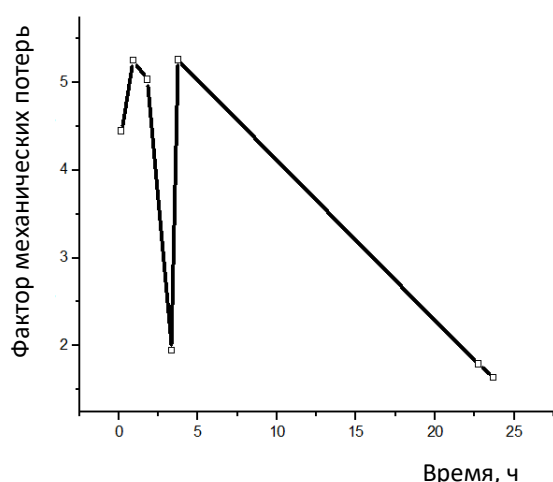


Рис. 3. Зависимость фактора механических потерь от времени для раствора гивпана с НПАВ в зазоре 3,6 мкм

Обсуждаемые графические данные наглядно демонстрируют влияние твердого тела — величины узкого зазора на вязкоупругие параметры одинаковых образцов (см. рис. 1 и 2, кривые 2, 3) и избирательное воздействие на разные растворы (см. рис. 1 и 2, кривые 1 и 2, 3).

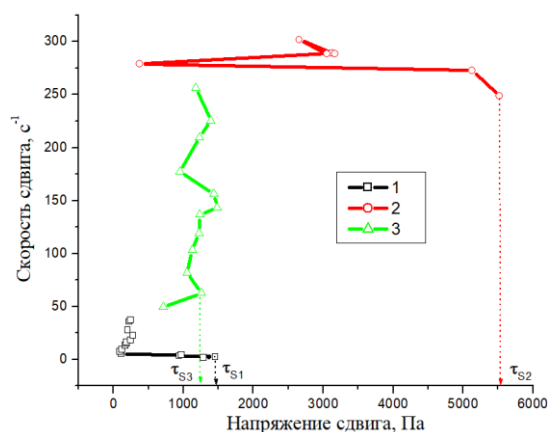
Селективность действия межфазных сил проявляется в более сильной модификации слабоструктурированных

жидкостей с НПАВ (см. рис. 1 и 2, кривые 2, 3), высокая подвижность структурных единиц которых обеспечивает их более плотную упаковку в пристенном слое. Из приведенного также следует, что поверхностно-активная добавка здесь является многофункциональной, обеспечивая, помимо гидрофобизации поверхности и увеличения текучести раствора, дополнительное усиление изолирующих характеристик разрабатываемого образца поверхностными силами.

На основе описанных микрореологических исследований был оптимизирован компонентный состав раствора, обеспечивающий наиболее высокие скорость и прочность структурно-механической коагуляции водонасыщенной пористой среды за счет контактного взаимодействия.

Радикальные изменения физических свойств флюидов в пластовой системе определяют специфику их продвижения в пористой среде.

Изучение этих процессов по предложенной методике показало, что действительно они принципиально отличаются от общепринятой вязкопластичной модели течения наличием S-образных фрагментов кривых с отрицательными углами наклона, где скорость, вопреки указанной модели, возрастает с уменьшением напряжения (рис. 4), и кратны бóльшим масштабам скоростей и напряжений сдвига. Для наглядности степени модификации структуры фильтраата можно сопоставить величины критических напряжений сдвига в данном случае (τ_s) и в объемных условиях [20], где для водного раствора гивпана этот показатель составляет 5,78 Па, для водоизолирующего раствора на его основе — 0,32 Па.



1 – водоизолирующий раствор в зазоре 3,6 мкм;
2 – водоизолирующий раствор в зазоре 1,8 мкм;
3 – гивпан в зазоре 1,8 мкм

Рис. 4. Кривые течения водоизолирующего раствора и гивпана в узких зазорах

Известно, что отмеченное является проявлением известного эффекта разрыва сплошности, наблюдаемого обычно в концентрированных суспензиях, растворах полимеров и их расплавах [18]. В нашем случае эффект проявляется в разбавленных полимерных растворах и вызван именно контактным взаимодействием, интенсивность которого резко убывает по мере удаления от границы раздела (см. рис. 4, кривые 1–3).

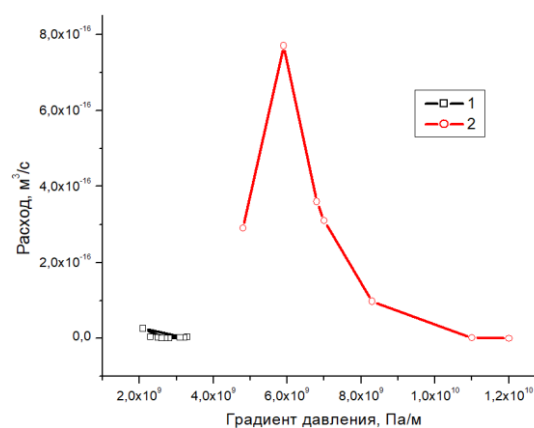
Не останавливаясь на анализе физики этого явления, подробно описанном в [18], отметим лишь его прикладное значение, состоящее в существенном усилении изолирующих свойств фильтрата, поскольку критический перепад давления в момент разрыва континуума локализуется во входной зоне порового канала и не распространяется на остальной объем поровой жидкости. По этой причине она фактически остается под действием существенно меньших давлений и сохраняет свои функциональные характеристики.

Принципиально важно подчеркнуть, что надмолекулярная структура

вязкопластичной жидкости в этих условиях необратимо разрушается, теряя свои физические свойства и способствуя тем самым прорыву фильтрата или пластовых вод.

Для сравнения влияния НПАВ и дальнего действия твердой фазы здесь (см. рис. 4) в одном масштабе представлены водные растворы гивпана (кривая 1) и его смесей с НПАВ (кривые 2, 3) в разных по величине зазорах.

Полученные данные микро-реологических измерений позволили оценить и сопоставить величину расхода гивпана (рис. 5, кривая 1) и его раствора с НПАВ (рис. 5, кривая 2) в поре диаметром 1,8 мкм по известному уравнению Букингама. Видно, что расход последнего возникает при напряжениях, вдвое превышающих условия течения гивпана, а после разрыва континуума резко снижается до уровня гивпана из-за перераспределения давления. Разрыв сплошности в нашем случае выполняет функции своего рода предохранительного клапана, обеспечивающего докритические давления в поре.



1 – гивпан; 2 – водоизолирующий состав

Рис. 5. Расход водного раствора гивпана и водоизолирующего состава в поровом канале диаметром 1,8 мкм

Важно приведенные рассчитаны взаимодействия При контакта состава вследствие первоначального механических свойств.	отметить, данные для в меньшей превосходство будет описанного скачка	что по расходу контактного течение длительности разработанного еще значительнее выше структурно-	Закключение Проведенные исследования позволили выяснить особен- ности структурообразования полимерных водоизолирующих композиций в конкретной пластовой системе, оценить вклад поверхностных сил в структурно-механи- ческую коьматацию пористой среды и на этой основе оптимизировать компонентный состав технологической жидкости.
--	--	--	--

Литература

1. *King F.H.* Principles and conditions of the movements of ground water: U.S. Geological Survey 19th Annual Report. Reston, VA: United States Geological Survey, 1898. Part II. 384 p.
2. *Пузыревская Т.Н.* Просачивание воды через песчаные грунты // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1931. Т. 1. С. 251–256.
3. *McHaffie I.R., Lenher S.* CCVIII. – The adsorption of water from the gas phase on plane surfaces of glass and platinum // Journal of the Chemical Society, Transactions. 1925. Vol. 127. P. 1559–1572. <https://doi.org/10.1039/CT9252701559>
4. *Фенчер Д., Льюис Д., Бернс К.* Физические испытания пород нефтяных и газовых пластов и их свойства. Баку; М.: Азнефиздат, 1934. 31 с. (Иностранная нефтяная техника / Всемирный нефтяной конгресс. Лондон, 1933; Вып. 105).
5. *Adzumi H.* On the flow of gases through a porous wall // Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1937. Vol. 12, No. 6. P. 304–312. <https://doi.org/10.1246/bcsj.12.304>
6. *Маскет М.* Течение однородных жидкостей в пористой среде / Пер. с англ. М.А. Геймана. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1949. 628 с.
7. *Кусаков М.М., Ребиндер П.А., Зинченко К.Е.* Поверхностные явления в процессах фильтрации нефти // Доклады АН СССР. 1940. Т. 28, № 5. С. 342–426.
8. *Дерягин Б.В., Ребиндер П.А., Зинченко К.Е.* Поверхностные явления в процессах фильтрации нефти // Доклады АН СССР. 1940. Т. 28, № 5. С. 432–436.
9. *Липатов Ю.С.* Коллоидная химия полимеров. Киев: Наукова думка, 1984. 343 с.
10. *Фукс Г.И.* Вязкость и пластичность нефтепродуктов / Под ред. проф. М.М. Кусакова. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1951. 272 с.
11. *Мархасин И.Л.* Физико-химическая механика нефтяного пласта. М.: Недра, 1977. 214 с.
12. *Аэро Э.Л., Бессонов Н.М., Булыгин А.Н.* Аномальные свойства жидкостей вблизи твердой поверхности и моментальная теория // Коллоидный журнал. 1998. Т. 60, № 4. С. 446–453.
13. *Голикова Е.В.* Роль граничных слоев воды в устойчивости дисперсных систем: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. СПб., 2004. 32 с.
14. *Zeng B., Cheng L., Li C.* Low velocity non-linear flow in ultra-low permeability reservoir // Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011. Vol. 80, No. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.10.006>

15. *Зайцев М.В., Михайлов Н.Н.* Влияние околоскважинной зоны на продуктивность скважины // Нефтяное хозяйство. 2004. № 1. С. 64–66.
16. *Эбзеева О.Р., Злобин А.А.* Анализ свойств граничных слоев нефти после заводнения пластов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. Т. 11, № 2. С. 87–94.
17. *Злобин А.А., Юшков И.Р.* Исследование импульсным методом ЯМР тонких гетеропленок на поверхности поровых каналов пород-коллекторов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2007. № 10. С. 64–67.
18. *Виноградов В.Г., Малкин А.Я.* Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 438 с.
19. *Кондрашев О.Ф., Шарипов А.У.* Модификация структурно-механических свойств полимеров в пористой среде. М.: Геоинформак, 2000. 56 с.
20. *Рогачев М.К., Кондрашев А.О., Кондрашев О.Ф.* Водоизоляционный полимерный состав для низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство. 2014. № 4. С. 63–65.

Contact phenomena during water insulation

O.F. Kondrashev

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

E-mail: kondr_of@mail.ru

Abstract. Microrheological studies of givpan-based gel-forming solutions in micron-sized pores have shown that contact interaction in the fluid–rock formation system leads to structural and mechanical colmatation of the porous medium, blocking of pore channels by elastic-viscous filtrate plugs, which under normal conditions exhibit viscoplastic qualities. It is shown that these processes develop immediately upon contact of the filtrate with the surface, and discontinuities at critical pressures do not worsen the water-insulating properties.

Keywords: boundary and adsorption layers, nonlinear filtration, shear elasticity, contact interaction, discontinuity.

Citation: Kondrashev O.F. Contact phenomena during water insulation // Actual Problems of Oil and Gas. 2023. Iss. 1(40). P. 27–35. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-40.art3> (In Russ.).

References

1. King F.H. Principles and conditions of the movements of ground water: U.S. Geological Survey 19th Annual Report. Reston, VA: United States Geological Survey, 1898. Part II. 384 p.
2. Puzyrevskaya T.N. Water seepage through sandy soils // Proceedings of the VNIIG. 1931. Vol. 1. P. 251–256. (In Russ.).
3. McHaffie I.R., Lenher S. CCVIII. – The adsorption of water from the gas phase on plane surfaces of glass and platinum // Journal of the Chemical Society, Transactions. 1925. Vol. 127. P. 1559–1572. <https://doi.org/10.1039/CT9252701559>
4. Fancher G.H. Lewis J.A., Barnes K.B. Physical tests and properties of oil and gas sands // Proceedings of the 1st World Petroleum Congress, London, UK, 18–24 July 1933. Paper WPC-1079. <https://onepetro.org/WPCONGRESS/proceedings-abstract/WPC01/All-WPC01/WPC-1079/203988> (Accessed on 28.04.2023).
5. Adzumi H. On the flow of gases through a porous wall // Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1937. Vol. 12, No. 6. P. 304–312. <https://doi.org/10.1246/bcsj.12.304>
6. Muskat M. The flow of homogeneous fluids through porous media. Ann Arbor, MA: J.W. Edwards, 1946. 763 p.
7. Kusakov M.M., Rebinder P.A., Zinchenko K.E. Surface phenomena in oil filtration processes // Doklady AN SSSR. 1940. Vol. 28, No. 5. P. 342–426. (In Russ.).
8. Deryagin B.V., Rebinder P.A., Zinchenko K.E. Surface phenomena in oil filtration processes // Doklady AN SSSR. 1940. Vol. 28, No. 5. P. 432–436. (In Russ.).
9. Lipatov Yu.S. Colloidal chemistry of polymers. Kiev: Naukova Dumka, 1984. 343 p. (In Russ.).
10. Fuks G.I. Viscosity and plasticity of petroleum products / Ed. by Professor M.M. Kusakov. Moscow; Leningrad: Gostoptekhizdat, 1951. 272 p. (In Russ.).
11. Markhasin I.L. Physico-chemical mechanics of the oil reservoir. Moscow: Nedra, 1977. 214 p. (In Russ.).

12. *Aero E.L., Bessonov N.M., Bulygin A.N.* Anomalous properties of a liquid near the solid surface and instant theory // *Colloid Journal*. 1998. Vol. 60, No. 4. P. 406–413.
13. *Golikova E.V.* The role of boundary layers of water in the stability of dispersed systems: Synopsis of Doctoral thesis. St. Petersburg, 2004. 32 p. (In Russ.).
14. *Zeng B., Cheng L., Li C.* Low velocity non-linear flow in ultra-low permeability reservoir // *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011. Vol. 80, No. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.10.006>
15. *Zajtsev M.V., Mikhajlov N.N.* Borehole zone effect on well deliverability // *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*. 2004. No. 1. P. 64–66. (In Russ.).
16. *Ebzeeva O.R., Zlobin A.A.* Analysis of properties boundary layers oil after its water flooding // *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and Gas Engineering and Mining*. 2012. Vol. 11, No. 2. P. 87–94. (In Russ.).
17. *Zlobin A.A., Yushkov I.R.* Investigation of thin heterofilms on the surface of pore channels of reservoir rocks by the pulsed NMR method // *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2007. No. 10. P. 64–67. (In Russ.).
18. *Vinogradov V.G., Malkin A.Ya.* Rheology of polymers. Moscow: Khimiya, 1977. 438 p. (In Russ.).
19. *Kondrashev O.F., Sharipov A.U.* Modification of structural and mechanical properties of polymers in a porous medium. Moscow: Geoinformak, 2000. 56 p. (In Russ.).
20. *Rogachev M.K., Kondrashev A.O., Kondrashev O.F.* Water-shut-off polymeric composition for low-permeable reservoirs // *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*. 2014. No. 4. P. 63–65. (In Russ.).