

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ВОДОИЗОЛЯЦИИ В НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

**М.К.РОГАЧЕВ**, *д-р техн. наук, профессор, rogatchev@mail.ru*

**А.О.КОНДРАШЕВ**, *канд. техн. наук, ассистент, kondrashev\_artem@mail.ru*

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия*

Представлены результаты фильтрационных исследований разработанного полимерного водоизоляционного состава ГПС-1, который представляет собой смесь водно-щелочного гидролизованного акрилсодержащего полимерного раствора с неионогенным поверхностно-активным веществом (ПАВ). Проведенные ранее реологические исследования показали, что добавление ПАВ позволяет снизить критическое напряжение сдвига, что должно привести к повышению проникающей способности полимерного состава в пористую среду.

Комплекс фильтрационных исследований состоял из опытов на одиночных образцах кернов и на моделях нефте- и водонасыщенного пласта. Полученные результаты свидетельствуют о значительном улучшении основных эксплуатационных параметров разработанного полимерного состава по сравнению с исходным: добавление ПАВ позволило снизить градиент давления закачки в 2 раза. Установлено и значительное (в 5 раз) повышение фактора остаточного сопротивления. Начальный градиент давления сдвига геля в 3 раза превышает значение этого параметра для исходного полимерного состава, что дает основание полагать, что разработанный состав будет создавать намного более прочный водоизоляционный экран в пласте.

Эксперименты на модели неоднородного нефтенасыщенного пласта показали, что после закачки полимерного состава происходит уменьшение подвижности воды в высокопроницаемом пропластке и увеличение ее в низкопроницаемом, что однозначно свидетельствует о перераспределении фильтрационных потоков. Снижение подвижности воды в высокопроницаемой зоне способствует выравниванию фронта вытеснения и дополнительному извлечению нефти, что и подтвердили проведенные опыты.

В результате выполненного комплекса фильтрационных исследований доказана эффективность использования разработанного полимерного состава ГПС-1 для регулирования фильтрационных потоков в низкопроницаемых неоднородных коллекторах.

**Ключевые слова:** заводнение, обводненность, неоднородный пласт, полимерный раствор, коэффициент нефтеизвлечения.

При разработке нефтяных месторождений инженерам постоянно приходится иметь дело с неоднородностью пластов, моделирование процессов разработки которых осуществляется в большинстве случаев математическими методами с использованием гидродинамических симуляторов. Наряду с неоспоримыми достоинствами, таким методам свойственны и принципиальные недостатки, заложенные в саму программную среду: во-первых, неправильное определение геологических параметров пласта, искажение этих параметров в результате осреднения модели, погрешности интерполяции и т.п. Во-вторых, поскольку модель описывается дифференциальными уравнениями с некоторым приближением, погрешность вводится приближением дифференциальных уравнений к конечно-разностным схемам. В-третьих, погрешности алгоритмов и расчетов приводят к погрешности модели [3, 6–10]. Таким образом, для получения достоверного результата наряду с математическим моделированием необходимо проведение экспериментов по физическому моделированию процессов фильтрации, с использованием моделей неоднородных пластов и пластовых флюидов.

Основной целью проведенных исследований было обоснование технологии внутрипластовой водоизоляции с применением разработанного водоизоляционного состава ГПС-1

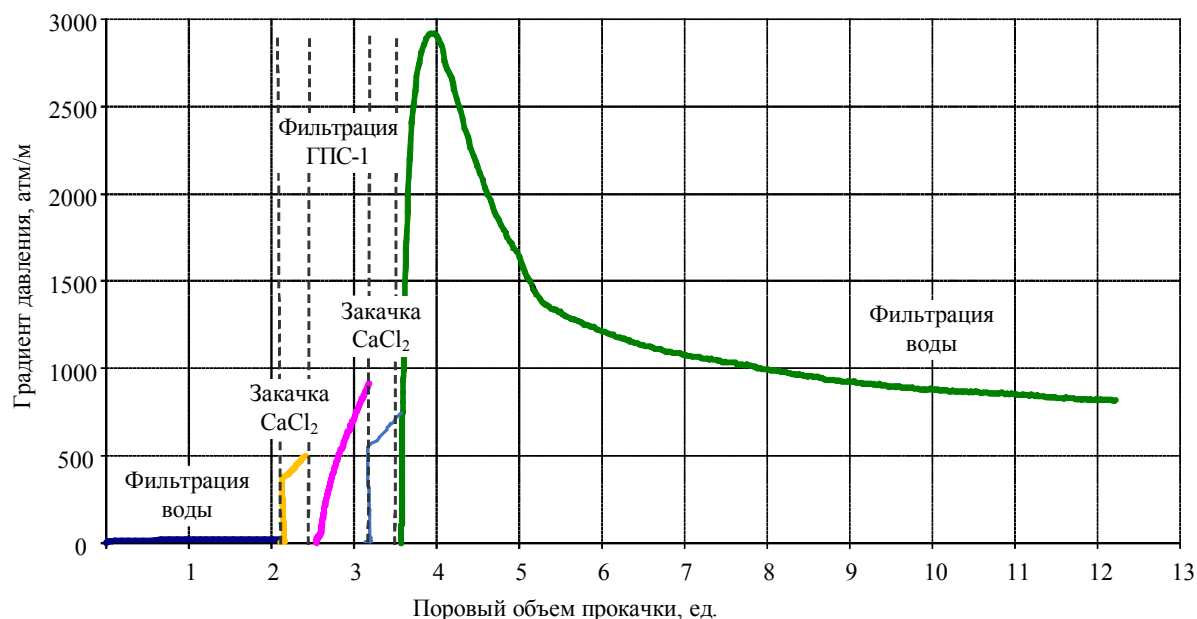


Рис.1. Зависимость градиентов давления от поровых объемов прокачки при закачке полимерного состава с оторочками раствора хлористого кальция (опыт 3)

на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами, а также для выравнивания профилей приемистости нагнетательных скважин. Полимерный состав ГПС-1 представляет собой смесь водно-щелочного раствора гидролизованного акрилсодержащего полимера (далее ПС) с добавлением 1 % по массе неионогенного ПАВ – продукта реакции ненасыщенных жирных кислот с аминами и их производными с растворителями и функциональными добавками [5, 8, 9].

Комплекс фильтрационных исследований проводился в два этапа: эксперименты на одиночных кернах и на моделях неоднородного нефте- и водонасыщенного пласта.

Проведенные ранее исследования (опыты 1 и 2), описанные в работе [5], позволяют судить о значительном улучшении проникающей и водоизолирующей способности разработанного состава ГПС-1, по сравнению с исходным составом ПС: добавление 1 % по массе ПАВ снижает градиент давления фильтрации состава в пористую среду на 50 % (после прокачки одного порового объема) и на 11 % повышает остаточный фактор сопротивления.

Результаты дальнейших исследований (опыт 3, рис.1) показали, что закачка оторочек раствора хлористого кальция значительно повышает водоизолирующую способность состава: фактор остаточного сопротивления вырос в 9 раз (по сравнению с опытом 1).

Таблица 1

Результаты первого этапа фильтрационных исследований (опыты 1-4)

Номер опыта	Жидкость насыщения керна	Водоизоляционный состав	Фактор остаточного сопротивления, ед.
1	Вода	Исходный состав ПС (без добавления ПАВ)	3,9
2	Вода	ГПС-1	4,4
3	Вода	ГПС-1 с оторочками $\text{CaCl}_2$	42,3
4	Нефть	ГПС-1	1,7

Результаты исследования селективности действия полимерного состава ГПС-1 показали, что его закачка в нефтенасыщенный керна (опыт 4, рис.2) привела к снижению фазовой проницаемости керна по воде в 1,7 раза, что значительно уступает значениям, полученным

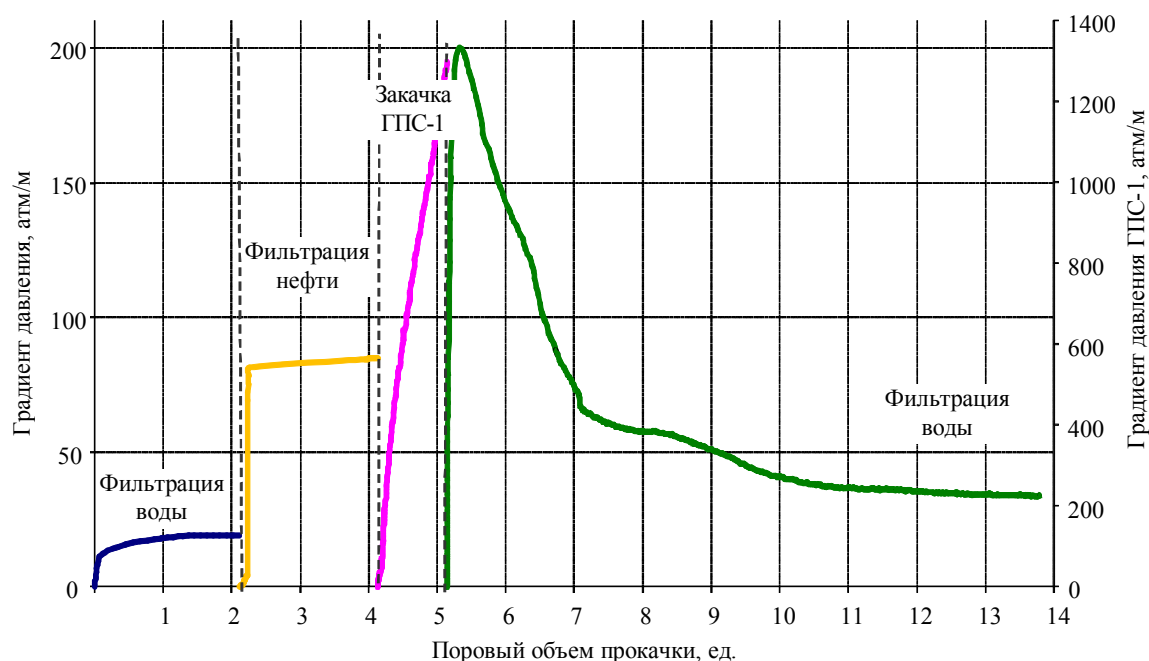


Рис.2. Зависимость градиентов давления от поровых объемов прокачки при исследовании селективности действия полимерного состава (опыт 4)  
(значения градиента давления закачки гелеобразующего состава ГПС-1 отсчитываются по шкале ординат в правой части графика, все остальные – по шкале в левой части графика)

в опыте 2 для водонасыщенного керна (табл.1). Таким образом, состав ГПС-1 обладает более высокими водоизолирующими свойствами в водонасыщенных интервалах, чем в нефтенасыщенных, что подтверждает наличие у него селективных свойств. Следует отметить, что полимерный состав готовится на водной основе, и его фазовая проницаемость близка к фазовой проницаемости воды, что, в свою очередь, приводит к его преимущественному проникновению в водонасыщенные каналы.

Для экспериментов на моделях неоднородного нефте- и водонасыщенного пласта использовалась фильтрационная система, оснащенная двумя сходными кернодержателями, предназначенными для насыпных моделей, различных по характеру и степени неоднородности пропластков – низко- и высокопроницаемого [1, 2, 4, 7].

Целью исследований было определение эффективности использования технологии закачки разработанного водоизоляционного состава с оторочками раствора хлористого кальция в условиях пластовых вод низкой и высокой минерализации на месторождениях с неоднородными по проницаемости коллекторами. Также планировалось определить прирост коэффициента нефтевытеснения при использовании технологии внутрипластовой водоизоляции с составом ГПС-1 для регулирования фильтрационных потоков и для выравнивания профиля приемистости нагнетательных скважин. Результаты экспериментов на модели неоднородного нефтенасыщенного пласта представлены в табл.2.

Результаты исследований показали, что во всех опытах средний коэффициент нефтевытеснения до закачки полимерного состава при полном обводнении продукции оказался примерно одинаковым и варьировал от 41 до 48 %. После закачки водоизоляционного состава во всех опытах наблюдалось уменьшение подвижности воды в высокопроницаемом пропластке и увеличение подвижности в низкопроницаемом, что свидетельствует о перераспределении фильтрационных потоков в модели неоднородного пласта.

Изучение влияния минерализации пластовых вод на эффективность водоизоляции при использовании разработанного полимерного состава ГПС-1 показало, что даже при применении пластовых вод с высоким содержанием ионов кальция прирост коэффициента неф-

тевытеснения (14 %, опыт 6) был намного меньше, чем при использовании оторочек раствора хлористого кальция (в среднем 31 %, опыты 7 и 8). Таким образом, на месторождениях с любой степенью минерализации пластовых вод при применении разработанного водоизоляционного состава ГПС-1 требуется одновременная закачка оторочек раствора хлористого кальция для повышения эффективности проводимых работ.

Таблица 2

Результаты фильтрационных экспериментов на насыпных моделях неоднородного нефтенасыщенного пласта (опыты 5-8)

Номер опыта	Соотношение проницаемости пропластков, ед.	Средняя начальная нефтенасыщенность модели пласта, %	Содержание CaCl <sub>2</sub> в модели пластовой воды, г/л	Средний коэффициент нефтевытеснения, %		Прирост коэффициента нефтевытеснения, %
				до закачки ГПС-1	после закачки ГПС-1	
Закачка водоизоляционного состава ГПС-1 без оторочек CaCl <sub>2</sub>						
5	6,8	70,3	0,613	44	52	8
6	6,3	69,7	32,974	41	55	14
Закачка водоизоляционного состава ГПС-1 с оторочками CaCl <sub>2</sub>						
7	6,2	69,5	0,613	46	75	29
8	6,5	71,2	32,974	48	81	33

Заключительным этапом исследований было изучение возможности применения разработанного состава для выравнивания профиля приемистости нагнетательных скважин, для чего были проведены фильтрационные эксперименты на модели неоднородного водонасыщенного пласта.

Определенный в результате экспериментов коэффициент селективности до закачки состава был равен 86 %, т.е. такой объем воды фильтровался по высокопроницаемому пропластку, доля низкопроницаемого пропластка в объеме фильтровавшейся воды, таким образом, составляла лишь 14 %. Результаты экспериментов на модели неоднородного водонасыщенного пласта приведены на рис.3.

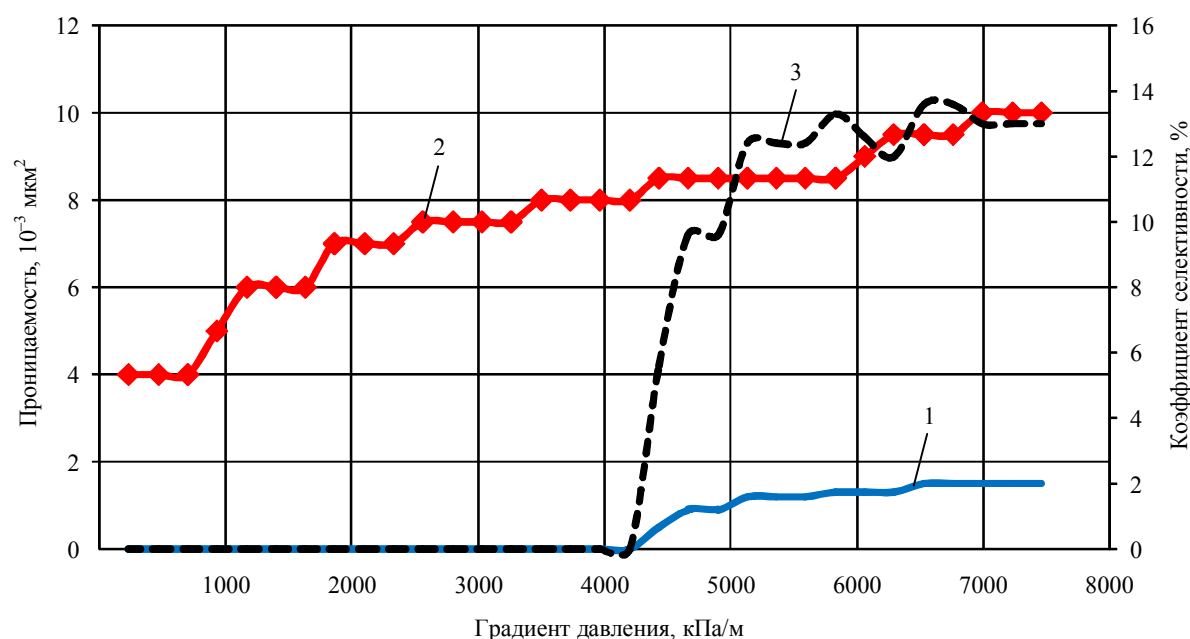


Рис.3. Зависимости проницаемостей высоко- (1) и низкопроницаемого (2) пропластков и коэффициента селективности (3) от градиента давления воды после закачки и выдержки полимерного состава ГПС-1

После закачки водоизоляционного состава в высокопроницаемом пропластке образовался прочный изоляционный экран, который позволил направить фильтрационный поток в низкопроницаемый пропласток. Как видно из графика (рис.3), до определенного момента (при градиентах давления ниже градиента давления сдвига геля в высокопроницаемом пропластке) коэффициент селективности равен нулю, при этом даже после прорыва воды по высокопроницаемому пропластку более 80 % жидкости фильтруется через низкопроницаемый пропласток (коэффициент селективности равен 13 %).

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что селективность действия разработанного водоизоляционного состава ГПС-1 будет проявляться в образовании водоизоляционного экрана преимущественно в водонасыщенной части пласта, а также за счет проникновения в большей степени в высокопродуктивные интервалы в случае добывающей скважины или интервалы с наибольшей приемистостью в случае нагнетательной скважины.

### Выводы

1. Результаты фильтрационных исследований, выполненных на образцах естественных кернов и моделях неоднородного нефтеводонасыщенного пласта с использованием разработанного гидрофобизированного полимерного состава ГПС-1, показали:

- способность полимерного состава ГПС-1 создавать в пористой среде пород-коллекторов прочный водоизоляционный экран;
- высокую селективность действия полимерного состава ГПС-1, выражающуюся не только в преимущественном образовании изоляционного экрана в водонасыщенных интервалах, но и в проникновении состава большей частью в обводненные зоны;
- возможность повышения коэффициента вытеснения нефти из неоднородного пласта путем закачки полимерного состава ГПС-1 с оторочками раствора хлористого кальция после полного обводнения высокопроницаемых пропластков;
- способность полимерного состава ГПС-1 эффективно блокировать высокопроницаемые промытые пропластки, выравнивая тем самым профиль приемистости нагнетательных скважин.

2. Результаты физического моделирования различных технологий внутрипластовой водоизоляции в низкопроницаемых неоднородных коллекторах с использованием полимерного состава ГПС-1 в условиях пластовых вод любой степени минерализации показали наибольшую эффективность закачки в пласт полимерного состава ГПС-1 с оторочками раствора хлористого кальция.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В.В. Моделирование полимерного заводнения слоисто-неоднородного пласта / В.В.Балакин, С.А.Власов, А.В.Фомин // Нефтяное хозяйство. 1998. № 1. С.47-48.
2. Газизов А.А. Регулирование заводнения неоднородных нефтяных залежей с применением осадкогелеобразующих технологий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа, 2004. 44 с.
3. Дейк Л.П. Практический инжиниринг резервуаров / Институт компьютерных исследований. М., 2008. 668 с.
4. Дурягин В.Н. Разработка неорганического водоизоляционного состава на основе силиката натрия для низкопроницаемых неоднородных коллекторов / В.Н.Дурягин, К.В.Стрижнев // Нефтегазовое дело. 2014. № 1. С.14-29. URL:[http://www.ogbus.ru/authors/DuryaginVN/DuryaginVN\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/DuryaginVN/DuryaginVN_1.pdf)
5. Кондрашев А.О. Водоизоляционный полимерный состав для низкопроницаемых коллекторов / А.О.Кондрашев, М.К.Рогачев, О.Ф.Кондрашев // Нефтяное хозяйство. 2014. № 4. С.63-65.
6. Лысенко В.Д. Инновационная разработка нефтяных месторождений. М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. 516 с.
7. Персиянцев М.Н. Повышение нефтеотдачи неоднородных пластов / М.Н.Персиянцев., М.М.Кабилов, Л.Е.Ленченкова. Оренбург: Кн. изд-во, 1999. 224 с.
8. Разработка гидрофобизированного полимерного состава для внутрипластовой водоизоляции низкопроницаемых коллекторов / А.О.Кондрашев, М.К.Рогачев, О.Ф.Кондрашев, С.Я.Нелькенбаум // Инженер-нефтяник. 2013. № 3. С.34-39.

9. Фильтрационные и микрореологические исследования водоизоляционных полимерных составов / А.О.Кондрашев, М.К.Рогачев, О.Ф.Кондрашев, С.Я.Нелькенбаум // Нефтегазовое дело. 2012. № 6. С.273-284. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/KondrashevAO/KondrashevAO\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/KondrashevAO/KondrashevAO_1.pdf)
10. Хисамов Р.С. Моделирование разработки нефтяных месторождений / Р.С.Хисамов, А.В.Насыбуллин; ОАО «ВНИИОЭНГ». М., 2008. 256 с.

## REFERENCES

1. Balakin V.V., Vlasov S.A., Fomin A.V. Modelirovanie polimernogo zavodneniya sloisto-neodnorodnogo plasta (*Modeling of polymer flooding of a layered heterogeneous formation*). Neftyanoe khozyaistvo. 1998. N 1, p.47-48.
2. Gazizov A.A. Regulirovanie zavodneniya neodnorodnykh neftnykh zalezhei s primeneniem osadkogeobrazuyushchikh tekhnologii (*Regulation of flooding of heterogeneous oil deposits using polymer technologies*): Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet. Ufa, 2004, p.44.
3. Deik L.P. Prakticheskii inzhiniring rezervuarov (*Practical engineering of tanks*). Institut komp'yuternykh issledovaniy. Moscow, 2008, p.668.
4. Duryagin V.N., Strizhnev K.V. Razrabotka neorganicheskogo vodoizolyatsionnogo sostava na osnove silikata natriya dlya nizkopronitsaemykh neodnorodnykh kollektorov (*Development of an inorganic waterproofing composition based on sodium silicate for low-permeability heterogeneous reservoirs*). Neftgazovoe delo. 2014. N 1, p.14-29. URL:[http://www.ogbus.ru/authors/DuryaginVN/DuryaginVN\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/DuryaginVN/DuryaginVN_1.pdf)
5. Kondrashev A.O., Rogachev M.K., Kondrashov O.F. Vodoizolyatsionnyi polimernyi sostav dlya nizkopronitsaemykh kollektorov (*Waterproof polymer composition for low-permeability reservoirs*). Neftyanoe khozyaistvo. 2014. N 4, p.63-65.
6. Lysenko V.D. Innovatsionnaya razrabotka neftnykh mestorozhdenii (*Innovative development of oil fields*). Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2000, p.516.
7. Persiyantsev M.N., Kabirov M.M., Lenchenkova L.E. Povyshenie nefteotdachi neodnorodnykh plastov (*Enhanced oil recovery from heterogeneous reservoirs*). Orenburg: Kn. izd-vo, 1999, p.224.
8. Kondrashev A.O., Rogachev M.K., Kondrashov O.F., Nel'kenbaum S.Ya. Razrabotka gidrofobizirovannogo polimernogo sostava dlya vnutriplastovoi vodoizolyatsii nizkopronitsaemykh kollektorov (*Development of a hydrophobized polymeric composition for in-situ waterproofing of low-permeability reservoirs*). Inzhener-neftyanik. 2013. N 3, p.34-39.
9. Kondrashev A.O., Rogachev M.K., Kondrashov O.F., Nel'kenbaum S.Ya. Fil'tratsionnye i mikroreologicheskie issledovaniya vodoizolyatsionnykh polimernykh sostavov (*Filtration and microrheological study of waterproofing polymer compositions*). Neftgazovoe delo. 2012. N 6, p.273-284. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/KondrashevAO/KondrashevAO\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/KondrashevAO/KondrashevAO_1.pdf)
10. Khisamov R.S., Nasybullin A.V. Modelirovanie razrabotki neftnykh mestorozhdenii (*Simulation of oil fields development*). VNIIOENG. Moscow, 2008, p.256.

---

## SUBSTANTIATION OF INTRASTRATAL WATER SHUTOFF TECHNOLOGY IN LOW PERMEABILITY RESERVOIRS

**M.K.ROGACHEV**, Dr. of Engineering Sciences, Professor, [rogachev@mail.ru](mailto:rogachev@mail.ru)

**A.O.KONDRASHEV**, PhD in Engineering Sciences, Assistant Lecturer, [kondrashev\\_artem@mail.ru](mailto:kondrashev_artem@mail.ru)  
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article presents the results of the filtration tests of the developed polymeric waterproofing compound GPS-1, which is a mixture of a water-alkaline hydrolyzed acryl-containing polymer solution with a nonionic surfactant.

The obtained results indicate significant improvements of main operational parameters – penetrating and water-insulating power of the developed polymeric composition GPS-1 in comparison with the original one: addition of the nonionic surfactant reduced the pressure gradient of injection twice. Also, considerable (5 times) increase of the residual resistance factor, that is explained by deeper and more uniform penetration of the solution into the porous medium and the corresponding raise of isolation efficiency of pore channels, is established.

Experiments on the model of a heterogeneous oil-filled formation showed that after the injection of the polymeric solution water mobility decreases in a highly porous interlayer and increases in a low-permeability interlayer indicating a redistribution of filtration flows in the model of a heterogeneous bed. The decrease of water mobility in a high-permeability zone contributes to the leveling of the displacement front and, ultimately, the additional extraction of oil from the less permeable area.

As a result of the complex of filtration tests conducted, the efficiency of the developed polymeric composition GPS-1 for the regulation of filtration flows in low-permeability heterogeneous reservoirs is proved.

**Key words:** core flooding, water cut, heterogeneous reservoir, polymer solution, oil recovery factor.