

4. Хабибуллин М. Я., Сулейманов Р. И., Давыдов А. Ю. Теоретические и лабораторные исследования работы устройства для импульсной закачки жидкости в скважину // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 3. – С. 16–21.
5. Хабибуллин М. Я., Сулейманов Р. И., Сидоркин Д. И. Лабораторно-теоретические исследования работы двухбалансирной конструкции устройства для импульсной закачки жидкости в скважину // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 5. – С. 109–113.
6. Хабибуллин М. Я., Петров В. А. Оборудование подземное установки скважинного штангового насоса. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – 54 с.
7. Хабибуллин М. Я., Шангареев Р. Р. Исследование процессов влияния давления и частоты импульсов на проникновение жидкости в песчаных образцах // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 4. – С. 120–125.
8. Аббасов Э. М., Агаева Н. А. Распространение упругих волн, создаваемых в жидкости, с учетом динамической связи системы пласт-скважина // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2014. – № 1. – С. 77–84.
9. Хабибуллин М. Я., Арсланов И. Г., Абдюкова Р. Я. Оптимизация процесса вытеснения нефти при стационарной импульсной закачке воды // Нефтепромысловое дело. – 2014. – № 3. – С. 24–28.
10. Мирзаджанзаде А. Х., Шахвердиев А. Х. Динамические процессы в нефтегазодобыче. Системный анализ, диагноз, прогноз. – М.: Наука, 1997.
11. Хабибуллин М. Я., Сидоркин Д. И. Определение параметров колебаний колонны насосно-компрессорных труб при импульсной закачке жидкостей в скважину // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 27–32.
12. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984.
13. Сулейманов Б. А., Аббасов Э. М. Восстановление забойного давления при вытеснении нефти водой с учетом немгновенного прекращения притока в скважину // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2010. – № 2. – С. 20–24.
14. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Расчеты в теоретической и прикладной механике. – Уфа: УГНТУ, 2016. – 94 с.
15. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Информационные технологии в расчетах нефтепромыслового оборудования // Научное обозрение. – 2015. – № 6. – С. 74–83.

#### **Сведения об авторах**

**Хабибуллин Марат Яхевич**, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru

**Сулейманов Рустэм Исхакович**, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 8(34767)65401, e-mail: rustamsul@rambler.ru

**Зайнагалина Ляйсян Зульфаровна**, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 8(34767)65401, e-mail: npmo@mail.ru

**Петров Вениамин Алексеевич**, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 8(34767)65401, e-mail: npmo@mail.ru

#### **Information about the authors**

**Habibullin M. Ya.**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of the Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru

**Suleymanov R. I.**, Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of the Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 8(34767)65401, e-mail: rustamsul@rambler.ru

**Zaynagalina L. Z.**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of the Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 8(34767)65401, e-mail: npmo@mail.ru

**Petrov V. A.**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of the Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 8(34767)65401, e-mail: npmo@mail.ru

УДК 622.276

## **ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНОГО И ЩЕЛОЧНОГО ЗАВОДНЕНИЯ ПЛАСТА ПК<sub>1-3</sub> ПРИ РАЗРАБОТКЕ ВОСТОЧНО-МЕССОЯХСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ** ASSESSMENT OF POLYMER AND ALKALINE FLOODING TECHNOLOGY OF THE LAYER PK<sub>1-3</sub> FORMATION IN DEVELOPMENT OF THE VOSTOCHNO-MESSOYAKHNSKOYE FIELD

**Ф. Т. Эюбов, С. К. Сохошко, А. А. Севастьянов, И. В. Коваленко**  
F. T. Eyubov, S. K. Sokhoshko, A. A. Sevastyanov, I. V. Kovalenko

АО «Мессояханефтегаз», г. Тюмень  
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень,  
ООО «Газпромнефть – НТЦ», г. Тюмень

*Ключевые слова: технологии полимерного и щелочного (ПАВ) заводнения, выравнивание профиля вытеснения, коэффициент извлечения нефти, межфазное натяжение*  
*Key word: technology of polymer and alkaline (surfactant) flooding; displacement profile equalizing; oil recovery; interfacial tension*

Заводнение с использованием технологии полимерного и щелочного (ПАВ) заводнения — это более совершенная технология повышения нефтеотдачи пласта по сравнению с обычным заводнением. Снижение межфазного натяжения (щелочь и ПАВ), выравнивание профиля вытеснения (полимер) достигаются в результате закачивания необходимых компонентов в пласт через сеть нагнетательных скважин. В работе дана оценка применимости компонентов, используемых в технологии полимерного и щелочного (ПАВ) заводнения, на объекте исследования — пласте ПК<sub>1-3</sub> Восточно-Мессояхского месторождения (ВММ).

На основании имеющейся информации в зарубежной и отечественной литературе установлено, что наиболее часто используемым типом методов увеличения нефтеотдачи (МУН) на месторождениях-аналогах ВММ являются тепловые методы, в частности закачка пара. Однако, как показывает мировой опыт, эффективность применения химических МУН выше тепловых. Наиболее эффективным методом химического МУН на месторождениях-аналогах является полимерное заводнение.

*Лабораторные исследования полимеров.* Ранее на месторождении была выполнена серия лабораторных исследований керн (2013 г.) скважин Восточно-Мессояхского месторождения (ВММ) для объекта ПК<sub>1-3</sub> [1]. Применение химических МУН, таких как полимерное заводнение, является перспективным для условий пласта ПК<sub>1-3</sub> ВММ. Довытеснение нефти водным раствором полиакриламида приводит к уменьшению остаточной нефти и увеличению коэффициентов вытеснения (при использовании полиакриламида PDA-1004 с концентрацией 0,25 % масс. к уменьшению остаточной нефти в среднем на 25 %, увеличению коэффициентов вытеснения в среднем на 17 %). На сегодняшний день поставки полимера PDA-1004 (Япония) в Россию почти прекращены, в связи с этим требуется проведение новых исследований полимеров, доступных на современном рынке.

Для определения необходимых значений параметров полимерных композиций (адсорбции полимера, остаточного фактора сопротивления раствора полимера, реологии раствора полимера при сдвиговом течении в свободном объеме, реологии раствора полимера в отсутствие эффекта сдвига в свободном объеме, максимальной концентрации полимера в закачиваемой воде) была проведена серия лабораторных исследований в условиях, максимально приближенных к геолого-физическим параметрам залежи пласта ПК<sub>1-3</sub> ВММ. В результате для лабораторных исследований из доступных на рынке и подходящих под условия пласта ПК<sub>1-3</sub> для проведения эксперимента было выбрано три марки полимера: «SNF» - FP 3630S, «BASF» - Spiro P 4231, «TianrunChemicals» - Tianfloc A 567.

Фильтрационные характеристики в пористой среде для выбранных марок полимера оценивались на насыпной модели пласта из дезагрегированного естественного керна пласта ПК<sub>1-3</sub> ВММ с моделированием пластовой температуры и средней проницаемости. В результате проведенных исследований установлено, что наилучшими показателями обладает полимер марки FP 3630S, производимый в промышленных масштабах.

#### *Фильтрационные исследования полимера FP 3630S*

Концентрация полимера, %	Адсорбция полимера, кг/кг	Остаточный фактор сопротивления (R <sub>ост</sub> )
0,10	0,00025	8,5
0,15	0,00042	9,3
0,20	0,00061	10,1

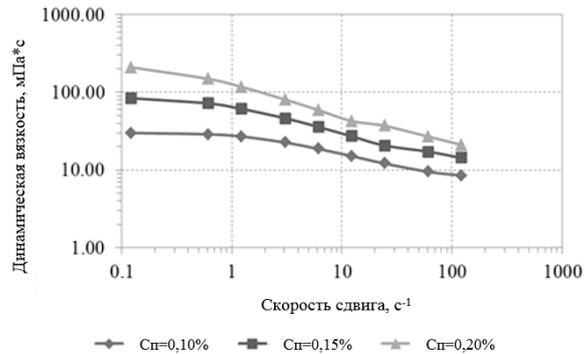
сопротивления в зависимости от концентрации при фильтрации через пористую среду керна месторождения (таблица).

Для растворов исследуемого полимера проведены более подробные исследования по реологическим характеристикам и зависимостям вязкости от скорости сдвига и концентрации в условиях Восточно-Мессояхского месторождения, исследование величины адсорбции на породе и ее зависимости от концентрации, а также остаточных факторов

Основными молекулярными характеристиками полиакриламидов, определяющими базовые технологические параметры их растворов, являются характеристическая вязкость (и связанная с ней молекулярная масса), содержание карбоксильных групп в макромолекулах полимера (степень гидролиза).

Исследования реологии растворов полимеров производились в диапазоне скоростей сдвига 0,122–122,3 с<sup>-1</sup>, с использованием вискозиметра BROOKFIELD DV2T, UL-адаптер (рис. 1). Рассматриваемый полимер хорошо растворяется в пластовой воде ВММ, нерастворимый остаток находится в пределах нормы.

Рис. 1. Реология растворов полимера FP 3630S:  
Cп — концентрация полимера



Моделирование полимерного заводнения на объекте исследования. Оценка эффективности технологии полимерного заводнения (для внедрения на объекте ПК<sub>1-3</sub>) производилась с помощью имитационного моделирования с использованием секторных гидродинамических моделей (ГДМ), характеризующих типовые зоны залежи ПК<sub>1-3</sub>, актуальные по состоянию на 01.01.2016 г. Расчеты проводились с использованием симулятора Eclipse 100.

Основной целью полимерного заводнения является снижение соотношения подвижности закачиваемой воды по отношению к подвижности нефти. Уменьшение подвижности закачиваемой воды при добавлении в нее полимера происходит по двум причинам. Во-первых, вязкость полимерного раствора выше, чем вязкость воды, и повышается с увеличением концентрации полимера. Во-вторых, после прохода через породу раствора полимера проницаемость горной породы для воды уменьшается по причине адсорбции полимера на поверхности породы. При этом вязкоупругие свойства полимера определяют его селективность при закачке в неоднородные по проницаемости пласты. В более проницаемые пропластки полимер поступает на большую глубину и в большем объеме, чем в малопроницаемые. За счет этого происходит перераспределение потока закачиваемой воды и выравнивание фронта вытеснения нефти водой.

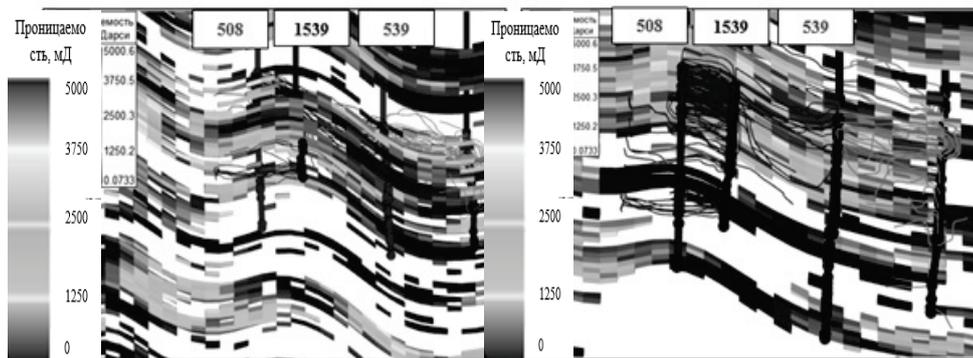


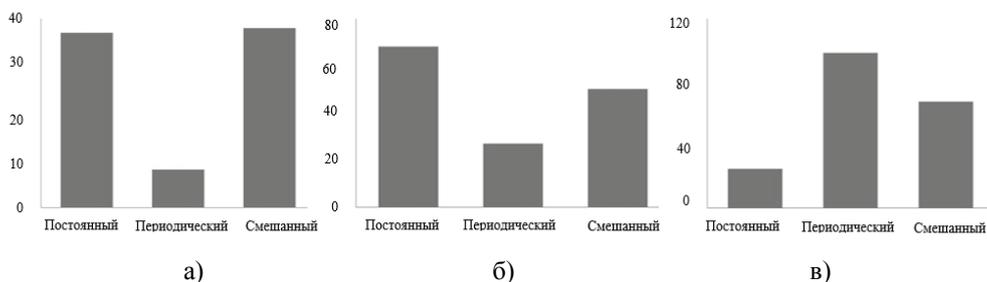
Рис. 2. Схема участка скважин, выбранного для оценки чувствительности эффективности метода к свойствам полимерной композиции

Для оценки возможного влияния вязкости раствора полимера на потенциальную технологическую эффективность были проведены два расчета с увеличенными и уменьшенными в два раза показателями вязкости при одинаковых значениях концентрации, адсорбции и остаточного фактора сопротивления. Под закачку были выбраны скв. 1 539, потенциально реагирующие скв. 508 и 539 (рис. 2).

Также производилось моделирование нескольких вариантов закачки полимера в пласт с поиском наилучшего показателя отношения объема дополнительно добытой нефти к объему закаченного полимера:

1. Постоянная закачка полимера до 2053 года — вариант «постоянный».
2. Циклическая закачка с циклом закачки полимера 9 месяцев, затем 12 месяцев закачка воды — вариант «периодический».
3. Циклическая закачка с циклом закачки полимера 3 месяца, затем 12 месяцев закачка воды (и так до 2031 года), далее постоянная закачка полимера — вариант «смешанный».

Исходя из анализа результатов имитационного моделирования полимерного заводнения для условий рассматриваемого подсектора пласта ПК<sub>1-3</sub>, для дальнейших расчетов по другим секторам ГДМ выбран вариант 3 «смешанный» (рис. 3).



*Рис. 3. Выбор наиболее эффективного варианта закачки полимера: а) отношение дополнительной добычи нефти к добыче нефти накопленной по базовому варианту, %  
б) отношение дополнительной добычи нефти к количеству полимера, т/т  
в) накопленная компенсация, %*

Выбор данного варианта расчета обусловлен наибольшим коэффициентом извлечения нефти КИН (+4 % к базовому), а также наименьшим снижением компенсации отборов относительно второго варианта. При этом дополнительная добыча нефти на одну тонну полимера составила 50,3 т/т, что незначительно ниже показателя полученного по варианту 1 «постоянный».

Применение технологии полимерного заводнения может быть реализовано как на одном кусте, так и на нескольких скважинах куста. Текущий проект предусматривает проведение закачки во все нагнетательные скважины одного куста с последующим внедрением данной схемы на все месторождение. При проектировании полимерного заводнения важными аспектами являются геологическое обоснование участка проведения работ, выбор химии и технико-технологические вопросы реализации проекта.

Внедрение полимерного заводнения рекомендуется производить в два этапа. Первый этап — внедрение и обустройство оборудования на один куст действующих, нагнетательных скважин, имеющих влияние на фонд добывающих скважин. Второй этап — подключение вновь пробуренных или переведенных с добывающего фонда нагнетательных скважин.

Для эффективного полимерного заводнения рекомендуется подбирать скважины со следующими параметрами: близость к ВНК не менее 10 м; проницаемость не менее 400 мД; приемистость не менее 400 м<sup>3</sup>/сут; близость до газовой шапки не менее 15 м; преимущественно латеральное распространение закачиваемого флюида.

*Предложения по повышению эффективности полимерного заводнения.* С целью повышения эффективности полимерного заводнения рекомендуется его совместное применение с такими компонентами, как щелочь и поверхностно-активные вещества (ПАВ), путем создания композиции по технологии полимерного и щелочного (ПАВ) заводнения.

Эффективным методом повышения нефтеотдачи является использование ПАВ при заводнении. В процессе вытеснения нефти поверхностно-активные вещества оказывают влияние на следующие взаимосвязанные факторы: межфазное натяжение на границе нефть — вода и поверхностное натяжение на границе вода — порода и нефть — порода, обусловленные их адсорбцией на этих поверхностях раздела фаз. Кроме того, действие ПАВ проявляется в изменении избирательного смачивания поверхности породы водой и нефтью, разрыве и отмывании с поверхности пород пленки нефти, стабилизации дисперсии нефти в воде, приросте коэффициентов вытеснения нефти водной фазой при принудительном вытеснении и при капиллярной проницаемости, повышении относительных фазовых проницаемостей пористых сред.

Пленочная нефть может покрывать гидрофобную часть поверхности пор пласта в виде тонкого слоя либо в виде прилипших капель, удерживаемых силами адгезии  $Wa$ . Работа силы адгезии, необходимой для удаления пленочной нефти с единицы поверхности пор в водную фазу, заполняющую поры, определяется уравнением Дюпре

$$Wa = \sigma + \sigma_{\text{вп}} + \sigma_{\text{нп}}, \quad (1)$$

где  $\sigma + \sigma_{\text{вп}} + \sigma_{\text{нп}}$  — свободная поверхностная энергия границ раздела фаз нефть — вода, вода — порода и нефть — порода соответственно.

Добавка к воде ПАВ приводит к изменению соотношения значений свободной поверхностной энергии благодаря адсорбционным процессам ПАВ на межфазных границах раздела. При этом межфазное натяжение, как правило, уменьшается.

Процесс добычи нефти с применением ПАВ заключается в снижении поверхностного натяжения на границе раздела вытесняющей и вытесняемой жидкостей до очень низких значений, при которых капиллярно-удерживаемая нефть становится подвижной.

Использование кислотного числа является эффективной методикой определения характеристики сырых нефтей на предмет того, насколько они привлекательны для щелочного заводнения. Кислотное число — это количество (в мг) гидроксиды калия (KOH), требуемое для нейтрализации одного грамма сырой нефти. Чтобы сделать это измерение, сырая нефть экстрагируется водой до тех пор, пока не будут удалены кислотные виды углеводородных компонентов.

За период с 1990 г. было проведено 127 исследований поверхностных проб нефти пласта ПК<sub>1-3</sub> ВММ на определение кислотного числа, среднее значение которого равно 0,41 мг KOH/г, при изменении в диапазоне от 0,05 до 1,3 (рис. 4).

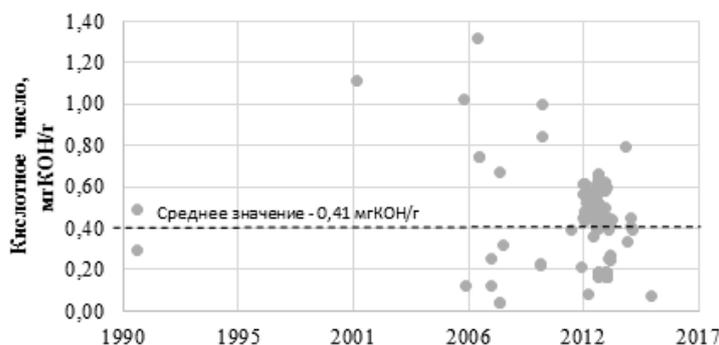


Рис. 4. Определение кислотного числа нефти пласта ПК<sub>1-3</sub> ВММ

Хорошим кандидатом для щелочного заводнения считается сырая нефть, имеющая кислотное число 0,5 мг КОН/г или выше, но кислотные числа, равные 0,2 мг КОН/г могут также представлять интерес, если в закачиваемом агенте будет присутствовать ПАВ для насыщения поверхностей раздела нефти и воды.

Закачка щелочи совместно с проведением плановых работ по интенсификации добычи с использованием гидромонитора, а также сменой насоса на этапе опытно-промышленной эксплуатации (август 2014 г.) на скв. 14 привели к двукратному росту жидкости (рис. 5).

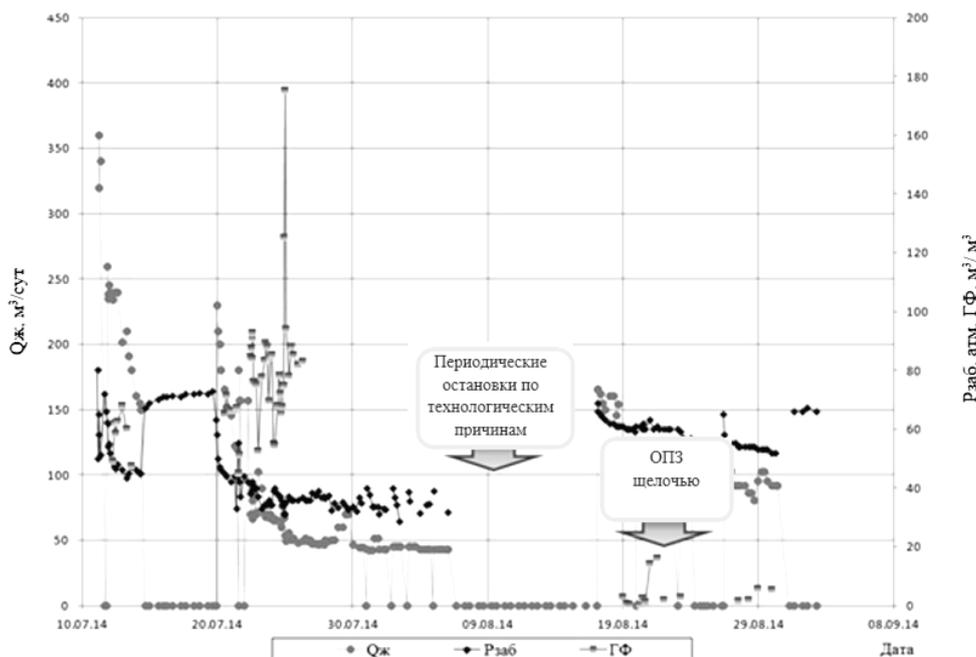


Рис. 5. Применение щелочного ОПЗ на ПК<sub>1-3</sub> ВММ

Критичным параметром, влияющим на эффективность любой технологии воздействия на пласты, является значение адсорбции. Опытным путем установлено, что добавление в процессе заводнения щелочи снижает адсорбцию компонент вытеснения (ПАВ, полимера) до двух раз. Следовательно, теоретические предпосылки, результаты собственных лабораторных и промысловых исследований позволяют рекомендовать применение щелочи при одновременном заводнении вместе с ПАВ и полимером.

Таким образом, по результатам предварительного выбора, многовариантного имитационного моделирования — полимерное заводнение является наиболее приоритетным видом МУН для объекта ПК<sub>1-3</sub> Восточно-Мессояхского месторождения.

Наиболее оптимальные условия применения метода полимерного заводнения: свойства нефти (плотность в стандартных условиях и вязкость в пластовых условиях), текущая нефтенасыщенность, невысокая температура пласта, свойства закачиваемой воды (минерализация и жесткость), отсутствие трещин.

Основные риски, которые могут повлиять на эффективность от реализации метода полимерного заводнения для объекта ПК<sub>1-3</sub> Восточно-Мессояхского месторождения — это высокая вертикальная неоднородность пласта, а также активность подошвенных вод, но данный параметр требует доизучения.

Для повышения эффективности полимерного заводнения рекомендуется в дальнейшем переход к применению трехкомпонентной технологии полимерного и

щелочного (ПАВ) заводнения. Компоненты, при их корректном подборе, могут значительно повысить технико-экономическую эффективность процесса заводнения. Для реализации положительного эффекта от применения технологии необходима организация участка опытно-промышленных работ на пласте ПК<sub>1,3</sub> ВММ.

#### *Библиографический список*

1. Эюбов Ф. Т., Севастьянов А. А. Оценка перспектив применения методов увеличения нефтеотдачи на ранней стадии разработки залежей нефти ПК<sub>1,3</sub> Восточно-Мессояхского месторождения // Приоритетные научные направления: от теории к практике. Сб. тр. XXXIV Междунар. науч.-практ. конф. – Ч. 1. – Новосибирск, 2016. – С. 217–225.
2. Алмаев Р. Х. Применение композиций полимеров и НПАВ для вытеснения нефти // Нефтяное хозяйство. – 1993. – № 12. – С. 22–24.

#### *Сведения об авторах*

**Эюбов Феликс Тофикович**, начальник отдела, АО «Мессояханефтегаз», г. Тюмень, тел. 8(3452)522190, e-mail: Eyufov.FT@tmn.gazprom-neft.ru

**Сохохико Сергей Константинович**, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283027, e-mail: sksohoshko@mail.ru

**Севастьянов Алексей Александрович**, к. т. н., доцент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283027

**Коваленко Игорь Викторович**, к. т. н., начальник отдела, ООО «Газпромнефть – НТЦ», г. Тюмень, e-mail: Kovalenko.IV@gazpromneft-ntc.ru

#### *Information about the authors*

**Eyufov F. T.**, Head of the Department, JSC «Messoyakhneftegaz», Tyumen, phone: 8(3452)522190, e-mail: Eyufov.FT@tmn.gazprom-neft.ru

**Sokhoshko S. K.**, Doctor of Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283027, e-mail: sksohoshko@mail.ru

**Sevastyanov A. A.**, Candidate of Engineering, Associate Professor, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283027

**Kovalenko I. V.**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, LLC «Gazpromneft-NTC», Tyumen, e-mail: Kovalenko.IV@gazpromneft-ntc.ru

## **Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта**

УДК 519.63+533.6

### **УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ДИССИПАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ EQUATION OF ENERGY WITH ALLOWANCE OF EFFECTS OF DISSIPATION IN CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEM**

**Н. В. Нестерович, А. Г. Обухов**

N. V. Nesterovich, A. G. Obukhov

*Тюменский государственный университет, г. Тюмень*

*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

*Ключевые слова: полная система уравнений Навье — Стокса; диссипация энергии; частные производные; цилиндрическая система координат*

*Key words: complete system of Navier-Stokes equations; energy dissipation; partial derivatives; cylindrical coordinate system*

Исследование трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа обычно проводится с использованием модели сжимаемой сплошной среды, которая основывается на численном решении полной системы уравнений Навье — Стокса [1–8]. Эта модель более адекватно описывает физические процессы течений газа в восходящих закрученных потоках под действием сил тяжести и Кориолиса, поскольку учитывает диссипацию энергии.

Полная система уравнений Навье — Стокса в безразмерных переменных в скалярной форме имеет вид [2]