

**На правах рукописи**



**Дудникова Юлия Константиновна**

**АКТИВНЫЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СОЗДАНИЯ И  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА В ВОДОНОСНЫХ  
ПЛАСТАХ**

25.00.17 – Разработка и эксплуатация  
нефтяных и газовых месторождений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2017**

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью  
«Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий –  
Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Научный руководитель – кандидат технических наук, **Хан Сергей Александрович**

Официальные оппоненты:

**Закиров Сумбат Набиевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ФГБУН ИПНГ РАН), Лаборатория газонефтеконденсатоотдачи пластов, главный научный сотрудник;

**Карнаухов Сергей Михайлович**, кандидат геолого-минералогических наук, ЗАО «Газпром ЭП Интернейшнл», советник генерального директора.

Ведущая организация – ФГБОУ Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ).

Защита диссертации состоится «17» мая 2017 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 511.001.01, созданного на базе Общества с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), по адресу: 142717, Московская область, Ленинский район, сельское поселение Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1, ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ООО «Газпром ВНИИГАЗ» [http:// www.vniigaz.gazprom.ru](http://www.vniigaz.gazprom.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д. г.-м. н.



Н.Н.Соловьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### ***Актуальность темы***

В настоящее время подземное хранение газа, как подотрасль газовой промышленности, развивается очень динамично. Этому способствуют существенное расширение Единой системы газоснабжения Российской Федерации и реализация новых проектов по поставке природного газа в Европу и Азиатско-Тихоокеанский регион.

Подземные хранилища газа (ПХГ) относятся к категории наиболее эффективных и безопасных в экологическом отношении технологий регулирования неравномерности газопотребления и обеспечения надежного газоснабжения промышленных и коммунально-бытовых потребителей.

Современная специфика эксплуатации ПХГ предопределяет выполнение не только сезонно ориентированных функций, но и требует учета колебаний спроса на газ и конъюнктуры рынка, что, в свою очередь, связано с повышением технологической маневренности системы подземного хранения. Поэтому важной задачей является увеличение потенциала суточной производительности ПХГ. В связи с этим поиск и разработка новых технологических решений, направленных на повышение производительности и продление безводного периода отбора газа при создании и эксплуатации ПХГ, является актуальной задачей исследований.

***Целью работы*** является разработка новых методов и технологических решений, направленных на повышение эффективности и надежности процесса создания и эксплуатации ПХГ в водоносных пластах.

### ***Основные задачи исследований***

1. Анализ и обобщение имеющегося опыта регулирования создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в водоносных пластах.
2. Разработка классификации методов регулирования создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в водоносных пластах.
3. Разработка усовершенствованной технологии изоляции газовой ловушки от подошвенных вод в период создания ПХГ в водоносной геологической структуре.
4. Моделирование процесса ограничения движения пластовых флюидов путем создания экранов в пласте.
5. Внедрение разработанной технологии эксплуатации ПХГ с установкой пластовых протяженных экранов из газожидкостных дисперсных систем на реальном объекте и анализ результатов.

### ***Научная новизна***

Разработаны критерии для классификации методов регулирования создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в водоносных пластах, которые позволяют выбрать способ создания и эксплуатации ПХГ.

Усовершенствована технология изоляции газовой ловушки от подошвенных вод в период создания ПХГ в водоносной геологической структуре, позволяющая ограничить возможность неконтролируемого

обводнения ПХГ при его циклической эксплуатации и существенно повысить период безводного отбора газа и, следовательно, активный объем ПХГ.

Решение гидродинамических задач эксплуатации скважины и ПХГ в целом при установке локальных и площадных экранов, с использованием аналитических методов и компьютерного моделирования, позволило оценить влияние экранирования на движение пластовых флюидов.

Проведенные исследования, на основе математического моделирования, выявили ограничения в пласте-коллекторе продвижения пластовых флюидов при создании искусственных экранов в объекте хранения газа.

На основе выполненных исследований разработан способ и получен Патент РФ № 2588500 Способ создания подземного хранилища газа в водоносной геологической структуре.

### ***Методология и методы диссертационного исследования***

В ходе проведения диссертационного исследования применялись методы теоретического и экспериментального познания, а именно: анализ существующих методов регулирования создания и эксплуатации ПХГ в водоносных пластах; математическое и компьютерное моделирование влияния естественных и искусственных экранов и несовершенства вскрытия пласта на приток флюидов к скважине при эксплуатации ПХГ; мониторинг промысловых данных и их анализ при промышленном использовании газожидкостных дисперсных систем (ГЖДС) для создания экрана на Увязовском ПХГ.

### ***Защищаемые положения***

1. Классификация методов регулирования создания и эксплуатации ПХГ в водоносных пластах по способу воздействия на пласт-коллектор.
2. Усовершенствованная технология создания подземного хранилища газа в водоносной геологической структуре с подошвенными водами, позволяющая ограничить возможность неконтролируемого обводнения ПХГ и существенно повысить период безводной эксплуатации.
3. Способ эксплуатации ПХГ с установкой пластовых протяженных экранов из ГЖДС, позволяющих ограничивать движение пластовых флюидов.

### ***Степень достоверности результатов проведенных исследований***

Достоверность защищаемых положений определяется результатами, полученными в ходе проведения теоретических исследований, путем анализа и обобщения опыта отечественных и зарубежных ученых, а также проведением промысловых испытаний с использованием стандартизированных методов контроля. В качестве инструмента для решения поставленных задач применялись аналитические методы и апробированные на практике лицензируемые программные комплексы по математическому моделированию.

Результаты диссертационных исследований в полной мере освещены в рецензируемых печатных изданиях и на научно-практических конференциях.

### ***Практическая ценность***

Разработанная в диссертации технология регулирования создания и эксплуатации ПХГ в водоносных пластах позволяет повысить эффективность и надежность их эксплуатации за счет увеличения суточной производительности

и снижения обводнения. Внедрение разработанной технологии позволяет значительно увеличить максимальную производительность объекта в период высокого спроса на газ, а также повысить объем отбора газа за сезон.

Разработанные методы прошли успешную промышленную апробацию на Увязовском ПХГ ПАО «Газпром».

Результаты диссертационной работы использованы при составлении Программ промышленного применения дисперсных систем в 2014 – 2016 гг. на Увязовском ПХГ для повышения суточной производительности и объема отбора, при составлении «Технологического регламента применения дисперсных систем при экранировании пластовой воды для повышения темпа отбора газа и продления безводной эксплуатации ПХГ».

#### ***Апробация работы***

Основные результаты выполненных исследований докладывались и обсуждались на отраслевых и международных конференциях, производственных научно-технических советах, в числе которых:

VI открытая научно-техническая конференция молодых специалистов и работников, приуроченная к празднованию 70-летия Победы в Великой Отечественной войне, ООО «Газпром добыча Астрахань» (Астрахань 2015);

26th World Gas Conference, (Paris, France 2015);

Заседание Комиссии газовой промышленности по разработке месторождений и использованию недр по рассмотрению итогов отбора газа в осенне-зимнем периоде 2014/2015 года, баланса газа ПХГ, закачки в летний период 2015 года и основных задачах на предстоящую зиму, ОАО «Газпром» (Москва 2015).

#### ***Публикации***

Основные результаты диссертационной работы отражены в 9-ти статьях, 5 из которых в изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК Минобрнауки РФ.

#### ***Структура и объем диссертации***

Содержание работы изложено на 142 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков и 8 таблиц. Список использованных источников включает 115 наименований.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

***Во введении*** обоснованы актуальность темы исследований, определена цель работы, поставлены задачи исследований, сформулированы защищаемые положения, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

***В первой главе*** рассмотрен комплекс вопросов, связанный с изученностью проблем регулирования создания и эксплуатации ПХГ в водоносных пластах.

Большой вклад в развитие теории и практики подземного хранения газа внесли следующие отечественные ученые – П.Я. Алтухов, Д.И. Астрахан, С.Н. Бузинов, С.А. Варягов, А.М. Власов, О.Н. Грачева, А.В. Григорьев, А.И. Гриценко, Э.Л. Гусев, Н.М. Дмитриев, А.Н. Дмитриевский, А.Е. Евгеньев, Н.А. Егурцов, С.Н. Закиров, В.В. Зиновьев, А.П. Зубарев, Ю.К. Игнатенко,

М.Ф. Каримов, А.Л. Ковалев, Ю.П. Коротаев, И.Н. Кочина, Л.Г. Кульпин, А.Г. Латыпов, А.Н. Лобанова, Е.В. Левыкин, В.М. Максимов, А.А. Михайловский, В.И. Парфенов, А.И. Понамарев, М.В.Пятахин, В.А. Садыков, О.Г. Семенов, П.В. Страдымов, Р.М. Тер-Саркисов, В.А. Томельгас, И.Д. Умрихин, М.В. Филинов, С.А. Хан, М.М. Харисов, А.Л. Хейн, Г.П. Цыбульский, И.А. Чарный, А.И. Ширковский, В.Н. Щелкачев, Д.А. Эфрос, а также зарубежные исследователи – С. Баклей, Г. Ботсет, Р. Виков, Д. Катц, Ж. Киллоу, М. Леверет, К. Ленд, М.Тек и другие.

Как показал анализ процесса создания и эксплуатации ПХГ, основные причины несвоевременного, а в некоторых случаях и неполного выхода хранилищ на проектные показатели и осложнения при их эксплуатации связаны с геологическим строением объектов хранения газа. В большинстве своем водоносные пласты, используемые для создания ПХГ, являются зонально неоднородными и неоднородными по напластованию. Слоистая неоднородность является одним из главных факторов, определяющих особенности заполнения газохранилищ, темпы отбора газа, объемы безводной добычи газа, сроки выхода на режим циклической эксплуатации и затрудняющих контроль и наблюдение за его работой.

Минимизировать негативные последствия, возникающие на хранилищах из-за геологических особенностей водоносных пластов можно с помощью различных методов регулирования процесса создания и эксплуатации ПХГ. Так, для решения проблемы обводнения газовых скважин широко применяется режимный метод эксплуатации с постоянной депрессией. Однако он не всегда может использоваться на стадии проектирования из-за недостаточной геологической информации объекта ПХГ, а ограничение депрессии снижает возможность достижения проектной пиковой производительности.

В настоящее время с целью повышения эффективности создания и эксплуатации ПХГ применяются различные методы регулирования закачки и отбора природного газа. Под методами регулирования создания и эксплуатации ПХГ понимается управление фильтрационными процессами, происходящими в объекте хранения при закачке и отборе природного газа.

К наиболее известным можно отнести такие газогидродинамические методы, как: площадное регулирование закачки и отбора газа, профильное регулирование закачки и отбора газа, регулирование темпов закачки и отбора газа, минимально допустимый отбор газа, определение технологических режимов эксплуатации и моментов закрытия скважин.

Для более полного представления о методах регулирования при создании и эксплуатации ПХГ в диссертационной работе рассматривались также отличные от традиционных методов так, называемые активные методы регулирования создания и эксплуатации ПХГ. Среди них известны развитые при разработке нефтяных месторождений методы управления фильтрационными потоками пластовых флюидов, которые заключаются в воздействии на проницаемость пласта-коллектора путем образования в пласте малоподвижных сред типа цементных растворов, гидрофобных эмульсий и

суспензий. Эти методы связаны с изменением фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пласта-коллектора и также используются при разработке газовых месторождений для изоляции пластовых вод в призабойной зоне скважины.

При добыче нефти и газа нередко технологически приемлемым является использование пен. Результаты исследования фильтрационных свойств пен отражены в авторских свидетельствах СССР (И.А. Чарный и др., 1965 г.) и патентов США (G.G. Bernard и др., 1966 г.).

При моделировании процессов совместной фильтрации флюидов в различных породах используются кривые относительных фазовых проницаемостей (ОФП). В расчетах часто используются зависимости ОФП, полученные экспериментально, полагая, что они для пород одного класса приблизительно идентичны.

Как известно, при взаимном замещении несмешивающихся флюидов в пористой среде возникает капиллярное давление на границе раздела фаз. Из-за неоднородности пласта капиллярные силы распределяются неравномерно и влияют на формирование фронта замещения. Из результатов моделирования следует, что малопроницаемые участки пористой среды, встречающиеся на пути движения границы раздела фаз, представляют препятствие, которое газ обходит по принципу наименьшего сопротивления. Вследствие неоднородности среды жидкость отстает от общего фронта, а газ опережает ее по высокопроницаемым участкам. В результате образуются так называемые языки и возникает возможность развития неустойчивого фронта вытеснения. Полнота вытеснения, определяемая как отношение объема пор, занятых газом, ко всему объему пор коллектора от нагнетательной скважины до среднего радиуса фронта *газ - жидкость* будет зависеть от устойчивого движения границы раздела.

Фильтрация пузырьков пены в пористой среде связано с разрушением и образованием новых поверхностей, что сопровождается расходом дополнительной энергии на преодоление сил упругости пузырьков (сил упругости Марангони) в межпузырьковых пленках (ламеллах). В результате сопротивление фильтрации газа сквозь пену не подчиняется закономерностям зависимостей Р. Викола и Г. Ботсета для системы *вода - газ*. То есть, при одинаковой газонасыщенности, фазовая проницаемость зависит от концентрации ПАВ в пленке и на 2-3 порядка меньше, чем при фильтрации газожидкостной смеси без ПАВ.

Как установлено на основании анализа существующих экспериментальных исследований, применение растворов ПАВ способствует увеличению полноты вытеснения воды газом за счет снижения капиллярных сил и «повышения» вязкости, образующейся при смешении раствора ПАВ и газа дисперсной системы, которая служит подвижным разделителем между вытесняемой водой и нагнетаемым газом. Вследствие этого движение становится устойчивым и коэффициент вытеснения раствора ПАВ газом на границе газовойодяного контакта (ГВК) достигает значений 0,6 – 0,8. На практике

это будет способствовать созданию компактного объема газа, минимизации его расплывания и технологических потерь вследствие растворения газа в пластовой воде.

М.Ф. Каримовым и М.М. Харисовым выполнено физическое моделирование процесса вытеснения жидкости газом и получены экспериментальные зависимости ОФП для жидкости и газа при фильтрации, сопровождающейся образованием дисперсной системы, которые использовались для оценки устойчивости движения ГВК с помощью компьютерного моделирования. На рис. 1 приведены результаты физического моделирования (слева) и компьютерного (справа), свидетельствующие о существенном повышении газонасыщенности при использовании ПАВ. Это свойство пен в пористой среде позволяет эффективно использовать их в качестве экранирующих средств при подземном хранении газа.

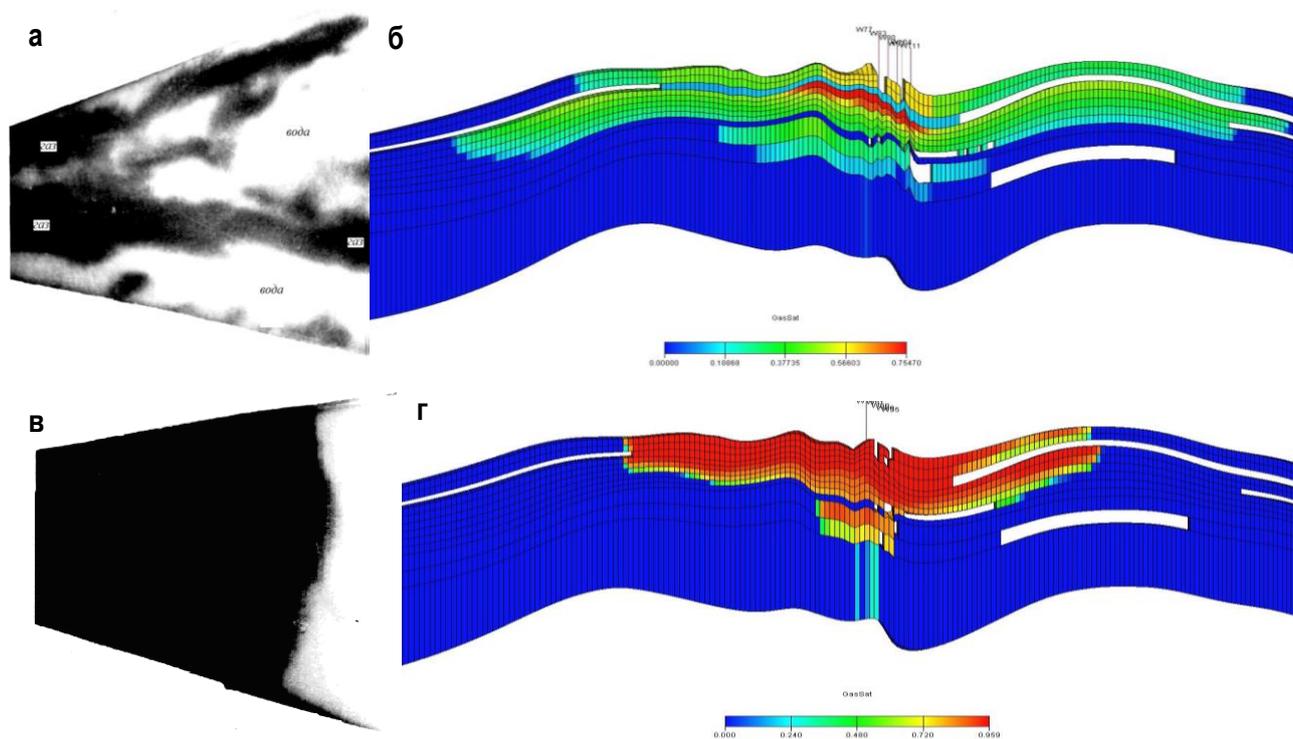


Рис. 1. Результаты моделирования вытеснения жидкости газом до закачки ПАВ при использовании кривых Викова – Ботсета и после для песчаника: а - физическое моделирование; б - компьютерное моделирование; и после закачки ПАВ в - физическое моделирование; г - компьютерное моделирование

Из проведенного анализа результатов исследований следует, что различные модификации гидродинамического управления движением ГВК оказываются малоэффективными ввиду большой разницы в вязкостях и плотностях воды и газа. Для достижения эффекта в более короткие сроки целесообразно использовать методы, позволяющие изменять ФЕС пористой среды. Автором диссертации делается вывод о необходимости совершенствования применяемых методов регулирования процессами создания и эксплуатации ПХГ в водоносных пластах.

На основании проведенного анализа существующих методов регулирования создания и эксплуатации ПХГ была разработана их классификация (Рис. 2). Основным критерием для классификации выбран способ воздействия на пластово-скважинную систему, исходя из которой все методы можно разделить на две группы: без изменения пластово-скважинной системы и с активным воздействием на пластово-скважинную систему (активные методы). К первой группе относятся все способы регулирования режимов эксплуатации скважин, перераспределения объемов нагнетания или отборов при неизменной пластово-скважинной системе, приводящие к изменению режимов работы искусственной газовой залежи. В этом случае изменяются только гидродинамические характеристики объекта эксплуатации. Использование таких методов не подразумевает существенного изменения первоначальных геологических характеристик и условий газовой залежи.

Ко второй группе отнесены методы воздействия на пласт-коллектор, в том числе посредством стороннего агента, с целью изменения первоначального состояния пластово-скважинной системы в сторону повышения эффективности функционирования ПХГ. Таким образом, к активным методам относятся все мероприятия по капитальному ремонту, бурению скважин и т.д. (Рис. 2).

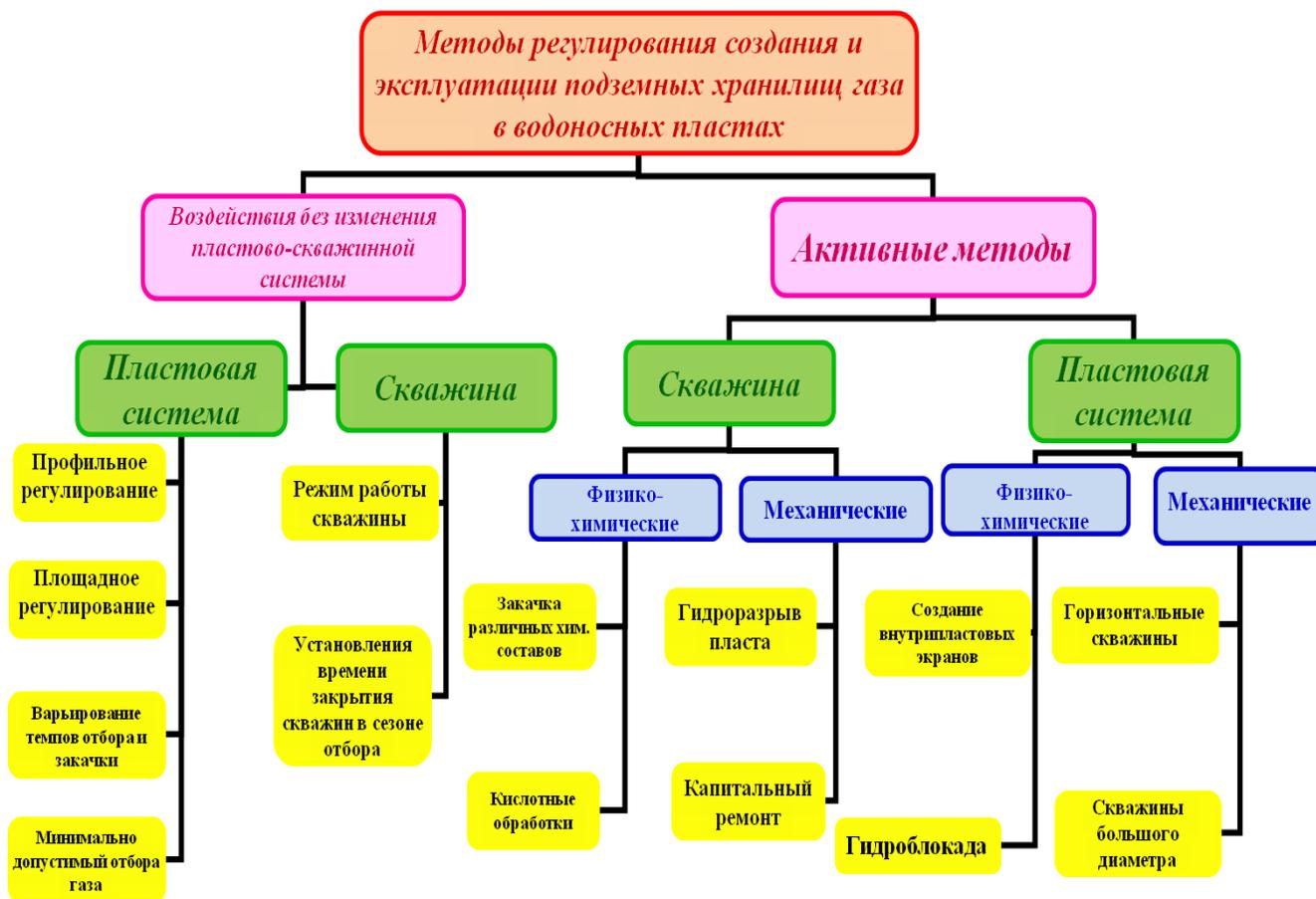


Рис. 2. Классификация методов регулирования создания и эксплуатации ПХГ в водоносных пластах.

Проведенный анализ результатов теоретических и экспериментальных

исследований экранирующих свойств пен отечественных и зарубежных авторов, а также опыта практического применения различных ПАВ позволяет сделать вывод о возможности их использования на объектах подземного хранения газа в водоносных пластах для повышения эффективности их создания и дальнейшей эксплуатации. В диссертации показана актуальность разработки новых технологий создания вертикальных (галерейных) и горизонтальных (площадных) внутрислоевых экранов для повышения эффективности эксплуатации ПХГ в реальных геологических условиях.

**Во второй главе** автором выполнена оценка технической возможности гидродинамического экранирования газового объема. Это особенно актуально в случае отсутствия природных геологических структур в водоносных пластах. Для оценки эффективности гидродинамических методов регулирования положения газового объема в диссертационной работе рассмотрен способ создания искусственной гидродинамической газовой ловушки, выполненный ВНИИГАЗом для Гатчинского ПХГ в 1970-х гг.

Рассмотрена плоская задача интерференции скважин при создании гидродинамической ловушки. Принятые параметры реализации искусственной гидродинамической ловушки следующие: 12 водонагнетательных скважин с дебитом 150 м<sup>3</sup>/сут на расстоянии 1 км друг от друга. Другие параметры: радиус контура питания,  $R_k = 5000$  м; радиус скважины,  $r_c = 0,15$  м; проницаемость пласта  $k = 1,8$  мкм<sup>2</sup>, вязкость пластовой воды  $\mu = 0,001$  Па·с, Начальное давление в зоне водонагнетательных скважин  $P_{nl} = 3,5$  МПа.

При линейном законе фильтрации и наличии нескольких стоков/источников для расчета поля давлений использован принцип суперпозиции. Для оценки значения пластового давления возьмем точку  $M$  в середине между 6-й и 7-й водонагнетательными скважинами.

Определить результирующий потенциал в точке  $M$  можно, пользуясь классической формулой из работ М. Маскета, И.А. Чарного, В.Н. Щелкачева:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n q_i \ln r_i + const ,$$

где  $n$  — число источников, для решаемой задачи равно 12;  $q_i$  - дебит источника на единицу толщины пласта;  $r_i$  — расстояние от  $i$ -го источника до точки, где определяется потенциал.

Полученное давление в точке  $M$  на 0,15 МПа больше, чем начальное давление в середине зоны расположения водонагнетательных скважин, тогда как давление между крайними скважинами цепочки гораздо ниже, чем в точке  $M$ . Для предотвращения растекания газа в этом направлении необходимо, чтобы давление на протяжении всей линии поддерживалось на уровне не меньшем 4,2 МПа, так как на основе промысловых данных установлено, что это значение могло бы обеспечивать экранирование. Для создания такого избытка давления необходимый расход воды по каждой скважине составит 700 м<sup>3</sup>/сут. Таким образом, на протяжении всей цепочки водонагнетательных скважин нет возможности создания устойчивого поля давления, которое препятствовало бы

перетоку газа. Очевидно, что наиболее вероятными областями для утечек газа будет середина расстояний между водонагнетательными скважинами, особенно находящимся на краях цепочки. Ибо именно там отмечается наименьшее давление вдоль всей линии нагнетания воды.

Далее приводятся результаты теоретических исследований экранирования движения подошвенных вод и их влияние на режимы работы одиночной скважины, выполненных аналитическим способом.

Изучению задач притока нефти и газа к несовершенной скважине посвящено много исследований, среди которых следует выделить работу М. Маскета, доказывающую, что зона пространственного притока составляет две толщины пласта. Основываясь на работах М. Маскета, И.А. Чарный, предложил двухзонный метод путем «сшивания» решения областей пространственной фильтрации и плоско-радиального притока. Этот метод в дальнейшем широко использовался многими исследователями – Е.М. Минским, А.П. Телковым, Г.А. Зотовым, З.С. Алиевым, К.С. Басниевым, В.М. Максимовым – которые ввели в рассмотрение три зоны. Применительно к оценке влияния установки экрана из дисперсных систем на продуктивные характеристики обводняющейся скважины. Четырехзонная модель притока реального газа к скважине с экранированной призабойной зоной позволила получить приближенное аналитическое решение. При учете несовершенства скважины по характеру вскрытия можно выделить четыре зоны, где пространственная фильтрация газа будет переходить в плоскорадиальную. Пространственной будет фильтрация непосредственно у скважины, где радиальный размер  $R_1$  в зависимости от вида фильтра считается равным величине порядка 2 – 3 радиусов скважины ( $R_1 = (2 - 3)r_c$ ). Предполагается, что в этой зоне фильтрация газа происходит по нелинейному двучленному закону фильтрации вследствие искривления линий токов у отверстий фильтра из-за несовершенства скважины по характеру вскрытия. Вторая зона (плоскорадиального движения) ограничивается радиусами  $R_1 = 3R_c$  и  $R_2 = R_{\text{Э}}$ , третья зона (пространственного движения) ограничивается радиусами  $R_2 = R_{\text{Э}}$  и  $R_3 = R_{\text{Э}} + H$ , таким образом, радиальный размер третьей зоны принимаем равным толщине пласта, а четвертая зона (плоскорадиального движения) ограничивается  $R_3 = R_{\text{Э}} + H$  и  $R_4 = R_k$ .

Полученные аналитические решения с выделением четырех расчетных зон фильтрации позволяют оценить прирост предельного безводного дебита скважины при наличии экрана в призабойной зоне и учете несовершенства скважины по характеру вскрытия. Из данной модели следует, что установка экрана в призабойной зоне в технологическом отношении эффективна, и эта эффективность возрастает в пластах с меньшей степенью вскрытия. Однако практически все пласты-коллекторы ПХГ являются неоднородными по напластованию, а создать абсолютно непроницаемый экран фактически невозможно. Поэтому задачу необходимо решать при условии установки малопроницаемого экрана, что создает серьезные трудности для решения задачи аналитическим путем. Поэтому исследования по оценке влияния экрана

в диссертации рассмотрены на трехмерном гидродинамическом симуляторе, позволяющем решать пространственные задачи совместной фильтрации газа и воды.

*В третьей главе* приводимые результаты исследования особенностей образования конусов воды получены на основе 3D компьютерного моделирования многофазной нестационарной фильтрации в неоднородной, анизотропной среде на симуляторе Eclipse E100 Schlumberger. При этом учитывались такие факторы, как неоднородное геологическое строение пласта, интерференция скважин и проницаемость экрана. Моделировалась работа ПХГ, имеющего макронеоднородность в виде литологического окна. Предполагалось, что повышение эффективности эксплуатации ПХГ будет достигнуто за счет перекрытия литологического окна искусственным экраном. Расчеты проводились при разной степени перекрытия (35 %, 50 %, 70 %, 100 %) литологического окна и для каждого случая, принималась различная проницаемость ( $k = 0,1 \text{ мкм}^2$ ,  $k = 10^{-2} \text{ мкм}^2$ ,  $k = 10^{-3} \text{ мкм}^2$ ) моделируемого экрана. Для сравнения и дальнейшей оценки влияния вариантов экранирования подошвенной воды на показатели эксплуатации ПХГ рассчитан вариант эксплуатации хранилища без экрана. Он условно назван автором диссертации базовым вариантом. По результатам расчетов оценивался суммарный объем отобранной воды из скважин ПХГ, работающих с постоянным дебитом в течение 150 сут. (Рис. 3).

Результаты показали, что, например, установка экрана с 35 %-м перекрытием литологического окна с проницаемостью  $k = 10^{-2} \text{ мкм}^2$  продлевает период безводной эксплуатации ПХГ по меньшей мере на 20 %, по сравнению с эксплуатацией без экрана.

Поставленная задача изоляции подошвенных вод, путем перекрытия литологического окна, характеризуется тем, что создается площадной экран. Для этого в сводовой области водоносной структуры осуществляется бурение скважин, через которые нагнетают природный газ до приближения границы ГВК к гипсометрическим отметкам, соответствующим проектному объему ПХГ. После этого последовательно осуществляют закачку через пробуренные скважины в область ГВК раствора ПАВ. Затем в область водоносной структуры, залегающей ниже ГВК, производят закачку неуглеводородного газа, близкого по своим физико-химическим свойствам к природному газу. При этом объемы водного раствора ПАВ и неуглеводородного газа выбирают из условия образования в процессе циклического отбора и закачки природного газа устойчивого изолирующего пластового экрана из пены. Он же получается в результате перемешивания при их совместной фильтрации в пористой среде (Патент РФ №2588500).

Создание сплошного площадного экрана на практике весьма сложно реализуемо, так как не будет обеспечено слияние зон распространения раствора. Поэтому необходим способ, позволяющий создавать с помощью минимального количества скважин достаточную зону перекрытия. В работе рассмотрен вариант проводки дополнительных боковых стволов в скважинах.

Для оценочных расчетов длина одной ветки крестообразной скважины принята равной 30 м. Если осуществлять закачку раствора дисперсной системы через скважину с боковыми стволами, можно создать площадной экран с размерами 1171,15 м<sup>2</sup>. При этом, как показали расчеты на модели, площадь созданного таким образом экрана за одно и тоже время будет примерно в 6 раз больше экрана, созданного через вертикальную скважину.

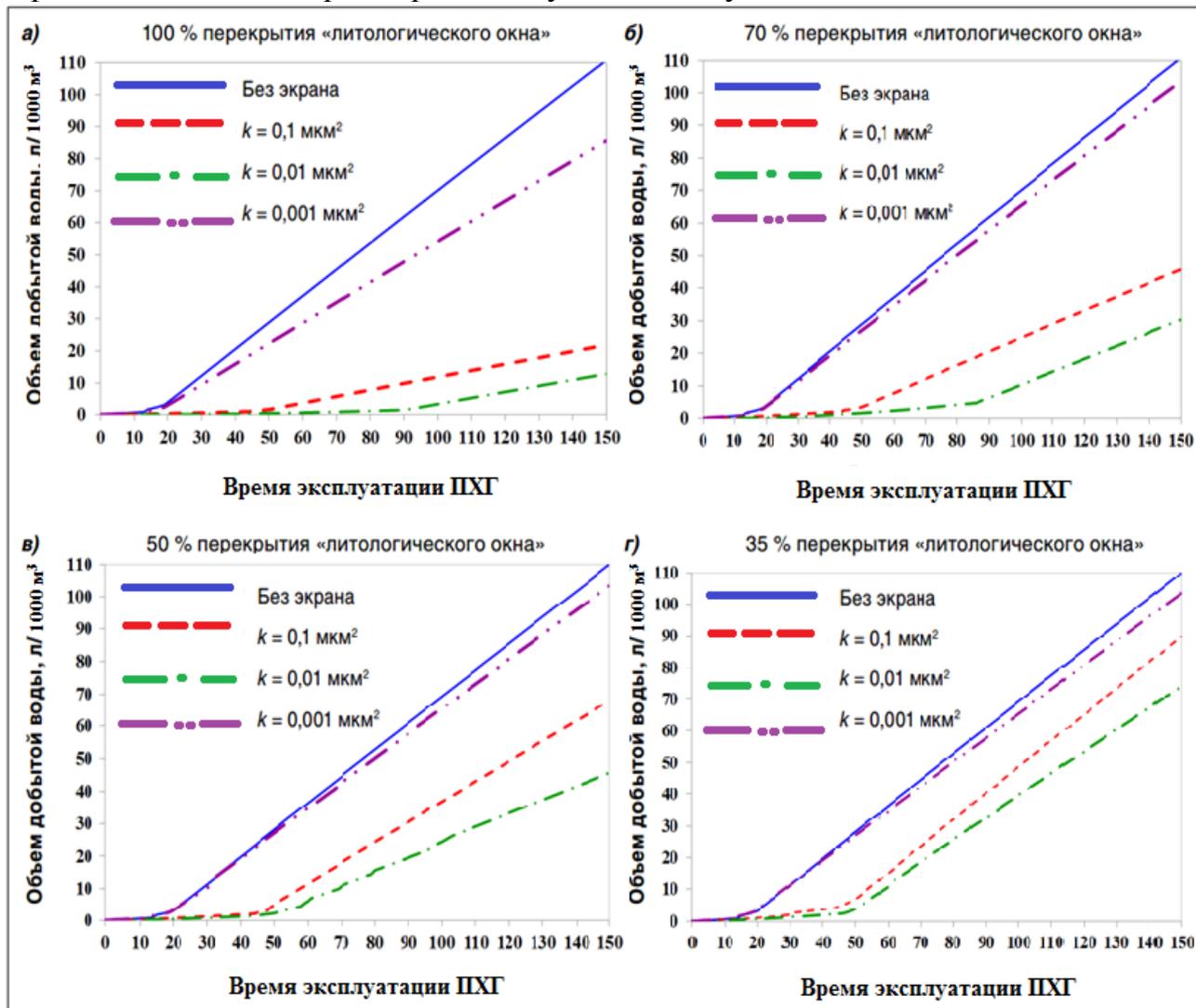


Рис. 3. Сравнение базового варианта с результатами моделирования установки экрана.

Таким образом, описываемая технология изоляции зоны газоносности ловушки от подошвенных вод в период создания ПХГ позволяет ограничить возможность неконтролируемого обводнения ПХГ при его циклической эксплуатации и существенно повысить период безводного отбора газа и, следовательно, активный объем газа в ПХГ.

**В четвертой главе** выполнено компьютерное исследование процесса ограничения движения пластовых флюидов путем создания искусственных экранов в пласте.

Дисперсные системы позволяют создавать экраны, распространяющиеся от скважин на десятки метров, которые являются обратимыми, тогда как другие способы ограничены призабойной зоной и приводят к необратимому снижению

проницаемости пористой среды. Моделирование создания экранов различной конфигурации и проницаемости осуществлено с помощью пакета Eclipse Schlumberger на трехмерной гидродинамической модели Краснодарского ПХГ.

Эффективность моделируемых экранов оценивалась объемом газа, перетекающим за время  $t$  из основного купола через межсводовый прогиб в Восточно-Александровское поднятие. Темп и время нагнетания газа для всех вариантов приняты одинаковыми. На рис. 4 показаны варианты расположения малопроницаемого экрана из дисперсных систем в синклинальной мульде. Вариант  $a$  – сплошной экран, созданный через горизонтальную скважину; вариант  $b$  – не сплошной экран, созданный через две наклонно-направленные скважины, не перекрывающие центральную часть мульды; вариант  $b$  – не сплошной экран, установленный через две горизонтальные скважины, пробуренные параллельно, также не полностью перекрывают мульду, но создают большее препятствие на пути течения газа. Вариант  $c$  – внутрислоистовый экран, создается в направлении перпендикулярном течению газа в мульде между куполами 1 и 2. Вариант  $d$  – экран, созданный через цепочку вертикальных скважин. Приняты следующие ограничения: в плане длина экрана  $a$  равна ширине той части мульды, где формируется основное русло перетока газа в соседнюю структуру между изогипсами  $-755$ м. В варианте  $b$  каждый экран по краям перекрывает одну треть ширины мульды. В варианте  $b$  общая длина экранов в сумме превышает ширину мульды, однако между экранами центр мульды не перекрывается. В варианте  $c$  экран, установленный перпендикулярно потоку газа, перекрывает центральную часть мульды. В варианте  $d$  экран, дискретный, созданный через цепочку вертикальных скважин, полностью перекрывает мульду.

Толщина (высота) экрана равна толщине пласта-коллектора, где вследствие перетока газа сформировались газонасыщенные слои. Ширина экрана определяется в зависимости от перепада пластового давления на экране. Во всех указанных выше вариантах экранирования рассмотрены также разные значения проницаемости ГЖДС:  $10^{-2}$  мкм<sup>2</sup>;  $10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>;  $10^{-4}$  мкм<sup>2</sup> и  $10^{-6}$  мкм<sup>2</sup>.

Компьютерное моделирование позволило получить следующие результаты. На рис. 4 показано в плане и в разрезе формирование потока газа через мульду. Объемы газа, проходящие через мульду при отсутствии экрана, за время  $t$ , равны 1,524 % от объема газа  $V$  в ПХГ.

Вариант  $a$  - почти полностью перекрывает как по ширине, так и по толщине основное русло перетока в мульде. Согласно табл. 1, при проницаемости экрана  $10^{-2}$  мкм<sup>2</sup>, через него проходит 0,68 %  $V$  газа в ПХГ, что составляет 0,45 доли от объема газа, проходящего через данное сечение при отсутствии экрана. С уменьшением проницаемости экрана до  $10^{-4}$  мкм<sup>2</sup>, этот показатель снижается до 0,32 и при понижении проницаемости дисперсной среды до  $10^{-6}$  мкм<sup>2</sup> доля перетока равна 0,16. При этом не только уменьшаются объемы перетекающего газа, но и повышается газонасыщенность пласта непосредственно перед экраном от 0,5 до максимальной величины  $0,75 \div 0,79$ .

Снижение проницаемости по газу до  $10^{-4}$  мкм<sup>2</sup> при создании дисперсной системы в пласте-коллекторе возможно, если повысить концентрацию синергетической композиции ПАВ до 0,5 масс.%. Объем перетекающего газа уменьшится более, чем в 3 раза. Практически «нулевая» проницаемость (снижение ее величины на 3 порядка) может быть достигнута при повышении концентрации раствора ПАВ до 1%. В этом случае экран, перекрывающий мульду, снижает объем перетекающего в другую структуру газа в 6 раз.

При условно нулевой проницаемости экрана ( $10^{-6}$  мкм<sup>2</sup>) зона высокой газонасыщенности перед экраном расширяется практически вдвое. За пределами экрана наблюдаются небольшие газонасыщенные «языковые» зоны за счет незначительного внедрения газа через нижние слои пласта в мульду. При уменьшении проницаемости экрана они резко сокращаются. Это происходит потому, что центральная часть мульды, где формируется основное русло движения газа из структуры в Восточно-Александровское поднятие, остается не перекрытой. В варианте *в* рассматривается случай, когда 2 экрана созданы при помощи двух горизонтальных скважин, пробуренных параллельно через мульду. Эти экраны создают большее препятствие для перетока газа, но также недостаточно эффективны из-за того, что центр мульды не полностью изолирован: снижение перетока газа происходит на 10 – 17% (табл. 1).

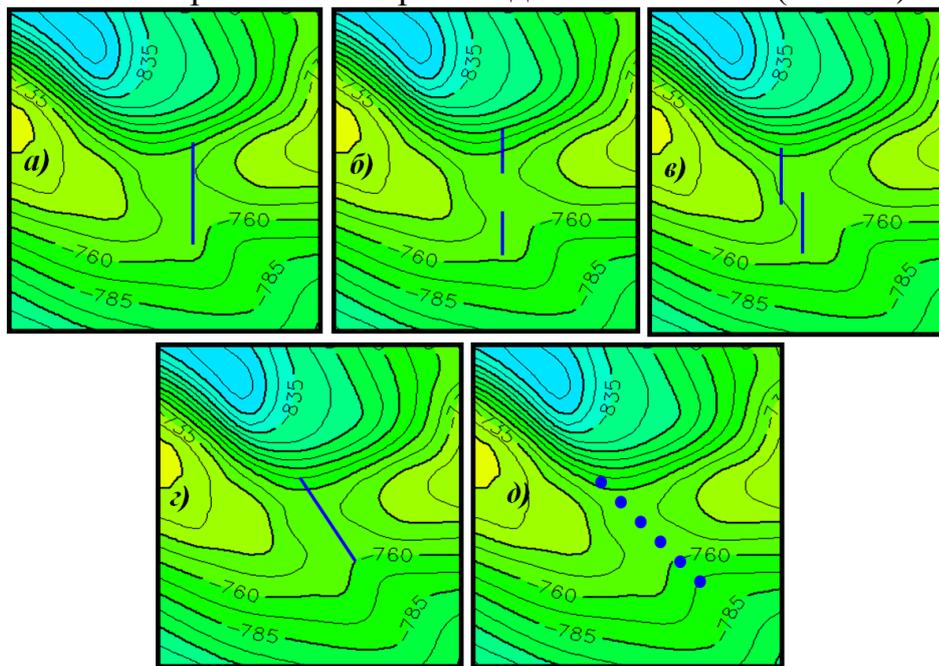


Рис. 4. Варианты расположения малопроницаемого экрана из дисперсных систем в синклинальной мульде

Расчеты показывают, что газонасыщенность пласта несколько повышается непосредственно перед экранами, но ниже чем в варианте *a* из-за того, что газ уходит через центр мульды и экраны не могут его удержать в пределах своего влияния. Однако и в этих случаях, чем ниже проницаемость экрана, тем меньший объем газа перетекает из первого купола во второй. Вариант *г* - экран поставлен перпендикулярно к линиям тока через мульду, его показатели ниже, чем у варианта *a*, но значительно лучше, чем у вариантов *б* и

*в* - он снижает переток газа на 28% - 52% в зависимости от проницаемости экрана. Этот вариант является более привлекательным вследствие егократно меньшей протяженности и, следовательно, меньшей стоимости создания. Вариант *д* создания внутрипластового экрана через цепочку вертикальных скважин показан на рисунке 2*д*. В данном случае могут быть использованы скважины как имеющиеся, так и вновь пробуренные по необходимости. Как видно, технологический эффект от снижения проницаемости экрана в  $10^{-2}$  мкм<sup>2</sup> до  $10^{-6}$  мкм<sup>2</sup> увеличивается в 2 раза (Табл. 1). Этот вариант в технологическом отношении предпочтительнее по сравнению с вариантами *б* и *в* и может быть применен для решения проблемы перетока газа не только через мульду, но и через обширные участки, где имеются тектонические нарушения пласта-коллектора или высокопроницаемые зоны вблизи проектных границ ПХГ.

Рассмотрены также варианты неполного перекрытия мульды между основным куполом и Восточно-Александровским поднятием экранами различной конфигурации и разной проницаемости. Так, при создании двух экранов у краев мульды (вариант *б*) переток газа уменьшается только на 9 – 10% (Табл. 1). В табл. 1 сведены результаты компьютерного моделирования процесса эксплуатации ПХГ без установки и при установке внутрипластовых экранов из дисперсных систем.

Таблица 1

Относительные объемы перетока газа через синклинальную мульду в зависимости от конфигурации экрана и значений его проницаемости

Относительные объемы перетока газа без экрана и с экранами различного размера и проницаемости, д.е.				
Без экрана	Проницаемость экрана, мкм <sup>2</sup>			
	$k = 10^{-2}$	$k = 10^{-3}$	$k = 10^{-4}$	$k = 10^{-6}$
	Вариант <i>а</i>			
1	0,45	0,43	0,32	0,16
	Вариант <i>б</i>			
1	0,91	0,9	0,9	0,9
	Вариант <i>в</i>			
1	0,91	0,88	0,87	0,83
	Вариант <i>г</i>			
1	0,72	0,61	0,49	0,48
	Вариант <i>д</i>			
1	0,79	0,78	0,73	0,61

Как следует из табл. 1, все варианты снижают перетоки от 21 % до 84 %. В каждом из них большое значение имеет расположение экрана относительно направления потоков газа или жидкости, которые требуется изолировать, и ФЕС пласта коллектора. Однако наибольший технологический эффект имеют варианты *а*, *г* и *д*.

Вариантов конфигурации экранов может быть несколько, при этом выбор



Геофизические исследования показали эффективность проведенных мероприятий: удалось увеличить газонасыщенную толщину скважин этого района хранилища. Это подтвердилось и данными эксплуатации: срок работы ряда скважин увеличился до 5 раз по сравнению с предыдущими годами, и уже к середине сезона отбора суммарный накопленный объем отобранного газа вырос в среднем до 10 раз, при этом водный фактор снизился, в среднем, в 4 раза. Другим фактором, позволившим оценить эффект от выполненной работы, явилась эксплуатация ПХГ в сезоне 2014 – 15 гг. при гидродинамическом регулировании, которое заключалось в применении компрессоров во второй половине сезона отбора. При увеличении суточной производительности в период снижения давления в зоне эксплуатации ниже гидростатического скважины, расположенные вблизи созданного барьера, показали существенный прирост в дебите. Практически все скважины, находящиеся в зоне влияния созданного экрана, показали существенный прирост суммарного объема отобранного газа и производительности: прирост объема добычи газа по данным скважинам, составил 56360,5 тыс. м<sup>3</sup> газа (Табл. 2).

Таблица 2

Сопоставление работы скважин Увязовского ПХГ в сезонах до и после проведенных работ

№ скв.	Сезон отбора 2013 – 2014 гг. (до обработки)		Сезон отбора 2014 – 2015 гг. (после обработки)		Прирост добычи газа	Кратность увеличения	
	V газа	Qскв.	V газа	Qскв.		объема отобранного газа	производи- тельности скважин
	т. м <sup>3</sup>	т.м <sup>3</sup> /сут	т. м <sup>3</sup>	т.м <sup>3</sup> /сут			
<b>73</b>	2387	30,4	3685	42,2	1298	1,54	1,4
<b>74</b>	9284	67,7	9725	55,6	441	1,05	0,8
<b>79</b>	11776	111,3	14856	123,6	3080	1,26	1,1
<b>83</b>	2270	9,1	13775	103,4	11505	6,07	11,3
<b>88</b>	393	0,3	2538	29,1	2145	6,46	97,4
<b>89</b>	772	4,2	22108	158,6	21336	28,64	37,7
<b>97</b>	371	3,0	4531	92,6	4160	12,21	30,6
<b>104</b>	1185	78,7	2847	34,0	1662	2,40	0,4
<b>107</b>	5620	30,2	15898	176,5	10278	2,83	5,8
<b>101</b>	706,7	3,7	1033,2	12,3	326,5	1,46	3,4
<b>122</b>	1212	77,2	1341	79,5	129	1,11	1,03
<b>Итого</b>	<b>35976,7</b>	<b>13,8</b>	<b>92337,2</b>	<b>86,6</b>	<b>56360,5</b>	<b>2,57</b>	<b>6,3</b>

Резкого обводнения скважин и, как следствие, выхода их из эксплуатации не произошло, а по ряду скважин значение водного фактора держалось значительное время в пределах допустимого. Для данного участка хранилища это является нехарактерным, так как обычно при увеличении суточной производительности скважины резко обводнялись и в дальнейшем не участвовали в отборе газа. Благодаря проведенным мероприятиям по этим скважинам удалось увеличить суточную производительность в 6,3 раза, а также обеспечить безводную эксплуатацию ряда скважин, которые в предыдущие

сезоны практически не участвовали в отборе газа из-за высокого водного фактора.

В работе выполнен анализ экономической эффективности проведенных промысловых испытаний. В качестве метода оценки их эффективности выбран экономический анализ денежных потоков, включающий все связанные с осуществлением проекта доходы и расходы посредством их сопоставления и учета их экономической значимости во времени.

Для анализа результатов оценки эффективности проведенных мероприятий используется показатель чистого дисконтированного дохода с использованием проекта и без него. Анализ полученных результатов за рассмотренный период показал, что показатель чистого дисконтированного дохода с проектом и без проекта при заданных параметрах составил 67,21 млн руб.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. На основании выполненного анализа и обобщения имеющегося опыта создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в водоносных пластах показано, что разработка новых активных методов регулирования создания и эксплуатации ПХГ является в настоящее время актуальной и практически значимой задачей.
2. Предложена классификация методов создания и эксплуатации ПХГ. Основными критериями которой являются способ воздействия на пласт-коллектор и тип объекта воздействия.
3. По результатам исследований свойств ГЖДС выбраны перспективные способы регулирования процессов создания и эксплуатации ПХГ.
4. Выполнена теоретическая оценка влияния экранирования потока подошвенных вод на режимы работы одиночной скважины. Поставлены и решены стационарные задачи притока воды и газа при наличии (установке) экрана в призабойной зоне скважины. На основании полученных решений изучена степень влияния естественных и искусственных экранов на продуктивные характеристики обводняющейся скважины, показавших их технологическую эффективность.
5. Выполнено моделирование влияния установки внутрислоевых экранов на период безводной эксплуатации ПХГ с использованием лицензируемого программного продукта Eclipse E100 Schlumberger. Исследованы случаи различной степени перекрытия литологического окна и проницаемости экрана. Результаты показали, что, например, установка экрана с 35 %-м перекрытием с проницаемостью  $k = 10^{-2}$  мкм<sup>2</sup> продлевает период безводной эксплуатации ПХГ по меньшей мере на 20 %, по сравнению с эксплуатацией без экрана.
6. Проведено 3D компьютерное моделирование процесса ограничения движения пластовых флюидов из объекта хранения путем создания искусственных экранов в пласте-коллекторе на пути миграции газа. На основании результатов исследований по каждому варианту создания

внутрипластового экрана из дисперсных систем получен положительный технологический эффект. Он показывает существенное влияние расположения экрана относительно направления изолируемых потоков газа или жидкости и ФЕС пласта-коллектора. Варианты конфигураций экранов следует выбирать на основе технико-экономической оценки их создания.

7. Разработана и запатентована усовершенствованная технология изоляции газовой ловушки от подошвенных вод в период создания ПХГ в водоносной геологической структуре, позволяющая ограничить возможность неконтролируемого обводнения при его циклической эксплуатации и существенно повысить период безводного отбора газа и, следовательно, активный объем.
8. Выполнен расчет экономической эффективности промышленного внедрения технологии, показавший, что чистый дисконтированный доход с использованием проекта и без него при заданных параметрах составляет 67,21 млн руб.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

1. Дудникова Ю.К. Оперативное и стратегическое управления работой ПХГ / Бузинов С.Н., Дудникова Ю.К., Воронов С.А. // Газовая промышленность. – 2013. – № 4. – С. 64–77.
2. Дудникова Ю.К. Минимизация осложнений при создании и эксплуатации ПХГ в водоносных пластах Хан С. А., Каримов М. Ф., Муллагалиева Л. М., Костиков С. Л., Тернюк И.М., Дудникова Ю. К. // Газовая промышленность. – 2014. – № 12. – С. 64–68.
3. Дудникова Ю.К. Оценка влияния внутрипластового экрана из дисперсных систем на снижение перетоков газа / Хан С. А., Дудникова Ю.К., Каримов М.Ф., Муллагалиева Л. М. // Газовая промышленность. – 2015. – № 10. – С. 8–12.
4. Дудникова Ю.К. Опыт создания протяженного пластового экрана из дисперсных систем при подземном хранении газа в водоносных пластах / Хан С. А., Каримов М.Ф., Муллагалиева Л.М., Дудникова Ю.К., Костиков С.Л., Никитин Р.С. // Газовая промышленность. – 2015. – № 8. – С. 70–74.
5. Дудникова Ю.К. Опыт применения поверхностно-активных веществ на подземном хранилище газа с целью повышения эффективности работы эксплуатационных скважин // Тезисы докладов VI открытой научно-технической конференции молодых специалистов и работников, приуроченной к празднованию 70-летия Победы в Великой Отечественной войне. ООО «Газпром добыча Астрахань». – Астрахань. – 2015. – С. 52.
6. Dudnikova Y. An Experience of Surface Active Substance Barriers Placed for Screening Out Stratum Water Advents to UGS Deposits / Dudnikova Y., Nikitin R. // report, 26th World Gas Conference, 1 – 5 June 2015, Paris, France.
7. Dudnikova Y. Active control methods of gas pool formation, report, 26th World Gas Conference, 1 – 5 June 2015. – Paris, France.

8. Патент РФ 2588500, Способ создания подземного хранилища газа в водоносной геологической структуре / Каримов М.Ф., Латыпов А.Г., Муллагалиева Л.М., Аглиуллин М.Х., Исламова А.А., Хан С.А., Костиков С.Л., Тернюк И.М., Дудникова Ю.К. Патентообладатель - ПАО «Газпром». - Приоритет от 28.04.2015; зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ 28.04.2015; опубликовано 27.06.2016.
9. Дудникова Ю.К. Оценка влияния установки экрана из дисперсных систем на обводнение эксплуатационных скважин / Хан С. А., Дудникова Ю.К., Каримов М.Ф. // Газовая промышленность. – 2016. – № 12. – С. 46–51.

Подписано к печати «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Заказ № \_\_\_\_\_

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,  
Ленинский район,  
сельское поселение Развилковское, пос. Развилка,  
Проектируемый проезд № 5537,  
владение 15, строение 1,  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»