

На правах рукописи

УДК 622.691.24

Зайцев Владимир Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ
ОТБОРА ГАЗА ИЗ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА В КАМЕННОЙ СОЛИ**

Специальность 25.00.17 - Разработка и эксплуатация нефтяных и
газовых месторождений

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва-2004

Работа выполнена в ООО "Подземгазпром" ОАО "Газпром" и Российском государственном университете нефти и газа имени И.М. Губкина

Научный руководитель - докт. техн. наук Казарян В.А.

Официальные оппоненты:

докт. техн. наук, проф. Иванцов О.М.

канд. техн. наук Михайловский А.А.

Ведущая организация - ОАО «ВНИПИгаздобыча»

Защита диссертации состоится "1" июня 2004 г. в
15 часов в ауд. 731

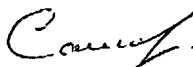
на заседании диссертационного совета Д.212.200.08 при Российском государственном университете нефти и газа имени И.М. Губкина по адресу:

Москва, В-296, ГСП-1, 119991, Ленинский проспект, 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина

Автореферат разослан "29" апреля 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
докт. техн. наук, проф.



Сомов Б.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В топливно-энергетическом балансе России около 80% составляют газ, нефть и продукты их переработки. В условиях характерной для Российской Федерации географической разобщенности районов добычи, переработки и использования жидких и газообразных углеводородов, совпадения по времени максимального спроса на топливо, на электро- и теплоэнергию, увеличения экспортных поставок, старения существующих газо- и нефтепроводов многократно повышается роль подземного хранения газонефтепродуктов.

Подземное хранение является основным и наиболее эффективным методом обеспечения надежности газоснабжения и позволяет решить весь комплекс задач, связанных с регулированием неравномерности газопотребления (сезонной, суточной, часовой) и резервированием газоснабжения (в аномально холодные зимы, экспорта газа, оперативного резервирования газотранспортных систем, долгосрочного резервирования добычи газа).

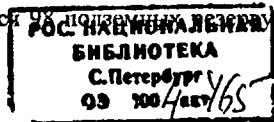
ЕСГ России насчитывает 22 подземных хранилища газа (ПХГ). Основными способами подземного хранения газа являются хранение в водоносных пластах и истощенных месторождениях (пористых структурах), ПХГ в которых используются в основном, как регуляторы сезонной неравномерности газопотребления. В настоящее время в России в ПХГ этого типа созданы запасы активного газа, составляющие примерно **12÷15 %** от объема годового потребления газа.

Наряду с сезонными запасами газа для надежного функционирования ЕСГ необходимы запасы для регулирования суточной и часовой неравномерности газопотребления и резервы для покрытия нештатных изменений спроса или предложения, которые составляют **10÷15 %** от объема сезонной неравномерности газопотребления. Покрытие пикового спроса должно осуществляться в короткие сроки и с высокой производительностью подачи газа.

В наибольшей степени этим условиям отвечают ПХГ, создаваемые в отложениях каменной соли. Такие хранилища способны работать в пиковом режиме эксплуатации, не требуют большого отвода земель в постоянное пользование, обеспечивают высокий уровень экологической, промышленной и гражданской безопасности, имеют высокую пожаро- взрывобезопасность и защищенность от воздействия современного оружия.

В геологическом отношении территория России обладает огромным потенциалом для создания подземных хранилищ в каменной соли. В европейской части расположено девять соляных площадей и бассейнов, в азиатской - шесть.

В России и СНГ по технологиям, разработанным в ООО "Подземгазпром" (ОАО "Газпром"), построены эксплуатируются



хранения жидких и газообразных углеводородов. В настоящее время в России намечается строительство 10 ПХГ в каменной соли

ПХГ в каменной соли состоят как из единичных, так и из групп подземных резервуаров, при этом подземные резервуары одного ПХГ могут различаться геометрическим объемом, конфигурацией, глубиной заложения, конструкцией эксплуатационной скважины.

Увеличение количества подземных резервуаров на ПХГ поставило важную задачу разработки новых технологических схем и режимов эксплуатации, обеспечивающих увеличение объема активного газа и производительности хранилища.

Решение этой задачи невозможно без разработки методов расчета и оптимизации режимов эксплуатации подземных хранилищ путем моделирования процессов закачки, хранения и отбора с использованием современного математического и программного обеспечения.

Таким образом, разработка методов расчета и оптимизации режимов отбора газа из ПХГ в каменной соли является актуальной научно-технической проблемой.

Цель работы

Цель работы заключается в разработке методов расчета и оптимизации режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли.

Основные задачи работы

1. Анализ и обобщение существующих в России и за рубежом методов расчета и оптимизации режимов эксплуатации подземного хранилища газа в каменной соли.

2. Анализ режимов отбора газа из подземного хранилища газа в каменной соли и определяющих их параметров.

3. Разработка математических моделей тепловых, газодинамических и других процессов, протекающих в элементах подземного хранилища газа в каменной соли при отборе.

4. Разработка на основе созданных математических моделей и структурного моделирования метода расчета режимов отбора газа из подземного хранилища газа в каменной соли и реализация его в виде программного комплекса для ПЭВМ.

5. Апробация метода расчета режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли на основе производственно-экспериментальных данных.

6. Разработка с помощью нового метода расчета рекомендаций по выбору оптимальных с точки зрения режима отбора газа конструкций эксплуатационных скважин подземных резервуаров.

7. Разработка метода оптимизации режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли, состоящего как из единичного, так и из группы подземных резервуаров,

8. Выбор оптимального распределения суммарной производительности отбора газа между единичными резервуарами подземного хранилища, состоящего из произвольного количества резервуаров.

Методы исследований.

Поставленные задачи решались с использованием: численных методов математического моделирования; результатов промышленных экспериментов; методов математической статистики при обобщении экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые для расчета режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли использован метод структурного моделирования, который позволяет рассматривать подземное хранилище, как единый технологический комплекс, с учетом нестационарных тепловых и газодинамических процессов, а также процессов влагонасыщения и гидратообразования в изменяющихся термобарических условиях.

2. Обоснована конструкция эксплуатационной скважины подземного резервуара с наименьшей удельной стоимостью скважины на единицу максимальной производительности отбора.

3. Впервые для решения задачи параметрической оптимизации режимов отбора газа из подземного хранилища газа в каменной соли, состоящего из единичного резервуара или группы резервуаров, использован метод структурного моделирования и методы прямого поиска.

4. Обоснована оптимальная схема распределения суммарной производительности отбора газа между единичными резервуарами подземного хранилища в каменной соли, состоящего из произвольного количества резервуаров.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, позволяющая рассматривать в процессе эксплуатации подземное хранилище в каменной соли, как единый технологический комплекс, состоящий из произвольного количества подземных резервуаров, скважин и наземного оборудования, соединенных шлейфами и трубопроводами.

2. Зависимость основных технологических и экономических характеристик эксплуатационной скважины подземного резервуара от ее диаметра и начального давления в подземном резервуаре.

3. Алгоритм оптимизации режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли, состоящего из единичного подземного резервуара или группы подземных резервуаров.

Практическая ценность результатов работы

1. Разработана и реализована в виде программного комплекса для ПЭВМ методика расчета режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли.

2. Разработана и реализована в виде программного комплекса для ПЭВМ методика оптимизаций режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли, состоящего из единичного подземного резервуара или группы подземных резервуаров.

3. Разработанные методики расчета и оптимизации использованы при создании завершенных и принятых к строительству проектов двух подземных хранилищ природного газа - Волгоградского и Калининградского ПХГ, а также при эксплуатации Ереванского ПХГ.

Апробация работы.

Основные результаты работы, отдельные положения и разделы диссертации докладывались и получили одобрение на Второй и Третьей Всероссийских конференциях молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России "Новые технологии в газовой промышленности", проходивших в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина 30.09-02.10.1997 и 28-30.09.1999.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ.

Объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 77 наименований. Диссертация изложена на 164 страницах, включая 55 рисунков и 17 таблиц.

Автор пользуется случаем выразить глубокую признательность д.т.н., профессору, заведующему кафедрой "Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений" РГУ нефти и газа им. ИМ. Губкина Басниеву К.С. за ценные советы на завершающем этапе работы, а также сотрудникам отдела строительства и эксплуатации подземных хранилищ в каменной соли ООО "Подземгазпром" за помощь в процессе разработки и внедрения методов расчета и оптимизации режимов отбора газа из ПХГ в каменной соли. Реализация созданных методов в виде программного комплекса стала возможна благодаря участию в этой работе к.т.н., доцента МГТУ им. Н.Э. Баумана Козлова О.С. и к.т.н. Ходаковского В.В.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, сформулирована основная цель и кратко изложена структура диссертационной работы.

В первой главе рассматриваются роль и назначение хранения природного газа в подземных хранилищах, создаваемых в каменной соли.

В настоящее время наиболее экономичным и перспективным является хранение как газообразных (природный газ, гелий, воздух), так и жидких (нефть, нефтепродукты) продуктов в подземных резервуарах, сооружаемых методом растворе-

ния через буровые скважины в отложениях каменной соли. В общем объеме созданного в мире подземного резервуарного парка в устойчивых непроницаемых породах на долю выработок, сооружаемых в каменной соли, приходится 80-85%. В работе приведены наиболее распространенные технологические схемы строительства, классификация и основные показатели подземных хранилищ в каменной соли.

Выполненный в первой главе анализ современного состояния и перспектив развития хранилищ этого типа в России и за рубежом показал, что в последние годы в таких странах, как Германия и США, сохраняется устойчивая тенденция к приоритетному использованию ПХГ в каменной соли для покрытия пиковых нагрузок газопотребления.

Анализ потребности в хранилищах природного газа в каменной соли, обеспечивающих устойчивое и надежное функционирование ЕСГ России, показал, что на ближайшую перспективу для различных регионов страны необходимо построить 121 подземный резервуар.

Основными технологическими параметрами ПХГ в каменной соли, от которых зависят затраты на его создание и эксплуатацию являются количество подземных резервуаров, объем активного газа, объем буферного газа, максимальное рабочее давление, минимальное (буферное) давление, максимальный суточный отбор газа, производительность закачки газа. В первой главе проанализированы особенности, отличающие технологические параметры подземных хранилищ газа в каменной соли от параметров хранилищ в истощенных месторождениях и в водоносных пластах, а также необходимые для расчета режимов отбора исходные данные и ограничения.

Методы расчета режимов отбора газа основаны на решении уравнений, описывающих процессы, происходящие с природным газом в выработке-емкости, скважине, шлейфах, трубопроводах и наземном оборудовании.

Исследованию режимов эксплуатации ПХГ в пористых структурах и в каменной соли посвящены работы таких авторов, как Богданов Ю.М., Бузинов С.Н., Горифьянов В.И., Задора Г.И., Игошин А.И., Казарян В.А., Левыкин Е.В., Мазуров В.А., Пышков Н.Н., Резуненко В.И., Ремизов В.В., Смирнов В.И., Федоров Б.Н., Ширковский А.И.

Анализ и обобщение существующих в России и за рубежом методов расчета и оптимизации режимов эксплуатации подземного хранилища газа в каменной соли показал, что проблема создания и практической реализации надежных математических моделей газодинамических и тепловых процессов в подземных резервуарах при отборе газа остается нерешенной.

Для расчета подземных резервуаров наибольшее распространение получили

сравнительно простые модели, в которых пренебрегается кинетической энергией конвективного движения газа в выработке-емкости по сравнению с внутренней энергией газа и учитывается только изменение внутренней энергии в процессе отбора. Существующие методы расчета позволяют, кроме процессов в выработке-емкости, рассчитывать также стационарные режимы течения газа в скважине и трубопроводе.

Практика проектирования и эксплуатации ПХГ в каменной соли показала необходимость разработки таких методов расчета режимов отбора, которые включали бы в себя алгоритмы расчета влагосодержания газа, отбираемого из подземного резервуара, и условий гидратообразования в элементах технологической схемы; использовали бы модель нестационарных газодинамических процессов в скважине и трубопроводах, а также позволяли бы решать задачи оптимизации параметров режимов отбора.

Кроме того, существующие методы расчета и оптимизации режимов отбора не позволяют рассматривать ПХГ, как единый технологический комплекс, включающий подземные выработки-емкости, скважины, шлейфы, трубопроводы и наземное оборудование.

Перечисленные выше требования вызвали необходимость создания новых методов расчета и оптимизации режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли.

В этой же главе сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе рассматриваются теоретические основы разработанного метода расчета режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли.

При расчетах режимов отбора газа необходимо решать следующие задачи:

- определение максимальной производительности отбора газа из ПХГ;
- определение активного объема газа, который может быть отобран из ПХГ при соблюдении действующих эксплуатационных ограничений;
- определение перепада давления, необходимого для обеспечения заданной производительности отбора или отбора заданного активного объема газа.

Исходные данные для расчета: начальные давление и температура газа в резервуарах; максимально допустимое давление газа в магистральном газопроводе; геометрический объем, конфигурация, глубина заложения подземных резервуаров; температура и теплофизические свойства окружающей подземные резервуары породы; состав природного газа; диаметры и длины скважин, шлейфов, трубопроводов и состав наземного оборудования.

Ограничениями режима отбора являются:

- минимальное давление газа в подземном резервуаре;
- температура и давление образования гидратов в скважине и наземном обо-

рудовании;

- максимальные скорость отбора газа и темп снижения давления газа в резервуаре.

Для выбора режимов отбора из ПХГ в каменной соли необходимо одновременно выполнять расчеты:

- процессов изменения термобарического состояния газа в подземных резервуарах;
- гидродинамических и термодинамических процессов в разветвленных трубопроводах, соединенных коллекторами;
- процессов теплообмена газа с окружающей резервуары и трубопроводы породой;
- термодинамических свойств природного газа;
- процессов влагонасыщения и гидратообразования в подземных резервуарах, трубопроводах и наземном оборудовании;
- " газодинамических процессов в запорно-регулирующих устройствах.

Разработанный метод расчета основан на численном решении систем нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений, описывающих процесс отбора газа из подземного хранилища в каменной соли. Для создания модели процесса отбора был использован метод структурного моделирования.

Метод структурного моделирования, блок-схема которого представлена на рис. 1, позволяет формировать модель процесса отбора в виде графической структурной схемы, состоящей из готовых блоков и линий связи.

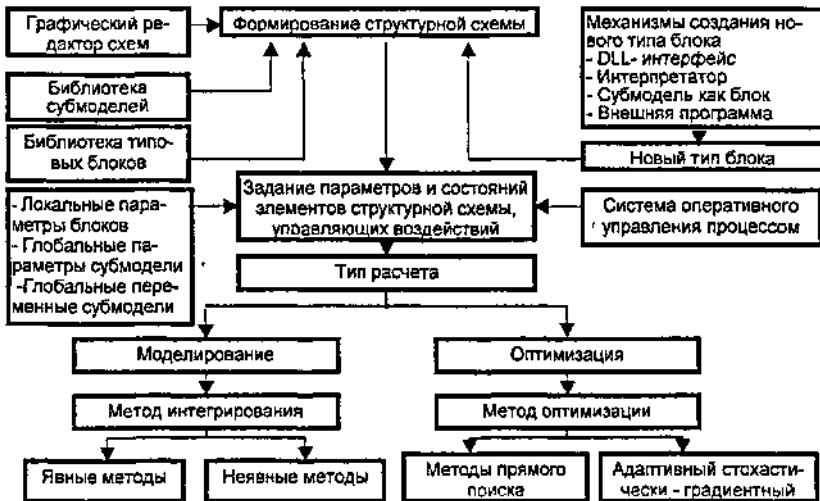


Рис.1. Блок-схема метода структурного моделирования

Блок является фундаментальным понятием структурного моделирования.

Каждый типовой блок представляет собой программно реализованную математическую модель того или иного явления, процесса, открытую для обмена информационными потоками с другими элементами структурной схемы. При этом блок имеет свой уникальный графический образ, позволяющий однозначно идентифицировать его на структурной схеме. На рис. 2 представлена общая конструкция блока.

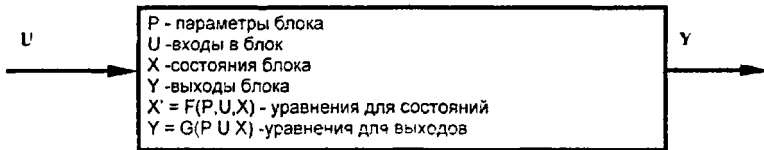


Рис. 2. Общая конструкция блока

Операторами F и G описывается математическая модель блока, при этом оператор F отвечает за поведение переменных состояния блока X (например, в виде системы уравнений для производных переменных состояния), а при помощи оператора G формируются выходы блока Y . Параметры блока P обычно определяют коэффициенты в уравнениях математической модели блока. Как видно из рис. 2, параметры P , состояния X , операторы F и G являются внутренними атрибутами блока, а входы U и выходы Y служат для обмена информационными потоками с другими частями структурной схемы.

Структурная схема отбора из подземного хранилища создается с помощью типовых блоков, входящих в общетехническую библиотеку, содержащую более 100 блоков, и типовых блоков, объединенных в специализированные библиотеки. Блоки, входящие в состав этих специализированных библиотек, реализуют математические модели и алгоритмы, необходимые для моделирования процессов при отборе из подземных хранилищ газа в каменной соли.

Линии связи между блоками представляют собой дополнительные неявным образом заданные уравнения и соотношения в общей модели процесса отбора.

Метод структурного моделирования является весьма эффективным с точки зрения гибкости, простоты и удобства задания и редактирования математической модели объекта исследования. В то же время такая форма представления математической модели неприемлема при реализации численного решения уравнений модели. Предварительно требуется преобразовать структурную схему в систему конечно-разностных уравнений в соответствии с выбранным численным алгоритмом решения. В результате преобразования блоков структурной схемы формируется система уравнений модели процесса отбора в нормальной форме. В общем случае это система нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений

(ДАУ) вида:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t), \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{y}(t), t), \end{cases} \quad (0)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_d(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k), \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{g}_d(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{y}_k), \end{cases} \quad (2)$$

где система уравнений (1) описывает непрерывные, а система уравнений (2) - дискретные блоки.

Первое векторное уравнение системы (1) является системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Остальные уравнения систем (1) и (2) образуют в общем случае систему нелинейных алгебраических уравнений (НАУ). Таким образом, основу численных методов и алгоритмов моделирования процесса отбора составляют методы интегрирования системы ОДУ и методы решения системы НАУ, а также алгоритмы, обеспечивающие их взаимодействие.

Для численного интегрирования может быть использовано несколько явных и неявных алгоритмов: метод Эйлера в классической постановке, метод Рунге-Кутты 4-го порядка с фиксированным шагом интегрирования, метод Кутты-Мерсона 4-го порядка с автоматическим выбором шага интегрирования, адаптивный явный метод интегрирования 3-го порядка с автоматическим выбором шага Скворцова, неявные модифицированные методы Гира и Адамса-Маултона.

В состав разработанной модели процесса отбора из ПХГ в каменной соли входят следующие математические модели и алгоритмы:

1) Метод контрольных объёмов. Алгоритм расчёта разветвленных теплогидравлических контуров технологической схемы ПХГ основан на методе контрольных объёмов. Согласно этому методу расчётная схема разветвленного теплогидравлического контура разбивается на ряд контрольных объёмов и соединяющих их гидравлических связей. Совокупность контрольных объёмов образует тракт течения теплоносителя в контуре. Исходные уравнения сохранения массы и энергии интегрируются в границах каждого из контрольных объёмов. В зависимости от характера протекающих в контрольном объёме гидродинамических и тепловых процессов используются различные математические модели/

2) Математическая модель нестационарных газодинамических процессов.

Система уравнений сохранения массы, импульса и энергии для этой модели имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(P + \rho w^2 \right) \right] = -\rho g \frac{dz}{dx} - \tau_0 \Pi, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho F \left(u + \frac{w^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho w F \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{w^2}{2} \right) \right] = \Pi q - \rho w g F \frac{dz}{dx}, \quad (5)$$

где w - линейная скорость газа вдоль оси канала; ρ - плотность газа; P - давление в газе; u - внутренняя энергия газа, ; q - плотность теплового потока; x - координата, совпадающая с осью канала; t - время; g - ускорение силы тяжести; z - высотная отметка; Π - периметр канала; τ_o - касательное напряжение на стенках канала; F - площадь поперечного сечения канала.

3) Математическая модель газодинамических и тепловых процессов в выработке-емкости. Выработка-емкость представляет собой ёмкость, заполненную газом. Газ в выработке-емкости участвует в процессе теплообмена с окружающей средой, масса и энергия газа зависят от массового расхода газа через подсоединенные к выработке-емкости скважины.

Выработка-емкость характеризуется: объёмом, поверхностью теплообмена. Изменение давления в выработке-емкости выражается следующим уравнением:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{\left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_h} \cdot \left[\frac{1}{V} \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_{вх}} G_{вх}^i - \sum_{i=1}^{N_{вых}} G_{вых}^i \right) - \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_P \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \right], \quad (6)$$

Уравнение сохранения энергии для выработки-емкости:

$$M \frac{\partial h}{\partial t} = \alpha \cdot (T_{cm} - T) \cdot F_{cm} + \sum_{i=1}^{N_{вх}} |G_{вх}^i| \cdot (h_{вх} - h) + V \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (7)$$

где G - массовый расход, кг/с; V - объем резервуара, m^3 ; T_{cm} - средняя температура стенки выработки-емкости, К; α - коэффициент теплоотдачи от газа к породе, $Вт/(m^2 \cdot K)$; T - среднемассовая температура газа, К; P - давление, Па; F_{cm} - площадь поверхности выработки-емкости, m^2 ; M - масса хранимого газа, кг; h - энтальпия, Дж/кг; $i=1, \dots, N$, (N - число гидравлических связей выработки-емкости); индекс "вх" относится к втекающим, а индекс "вых" - вытекающим расходам.

Исходные основные уравнения сохранения массы, импульса и энергии для потока газа и уравнения для давления и энергии в выработке-емкости необходимо дополнить системой замыкающих соотношений, которые включают: теплофизические свойства природного газа; модели теплообмена; зависимости для расчета необратимых потерь давления.

Расчет теплофизических свойств газовой смеси выполняется с использованием уравнения состояния Реддиха-Квонга.

Математическая модель процессов теплообмена газа, находящегося в выработке-емкости и в скважине, с окружающей соляной породой основана на формуле Ньютона с детализацией описания коэффициентов теплоотдачи в зависимости от определяющих критериальных чисел (Нуссельта, Рэлея и т.д.), от геометрии ре-

зервуара и характеристик движения в нем.

Температура поверхности выработки-емкости T_{cm} зависит от распределения температуры в породе, которое определяется из решения одномерного уравнения нестационарной теплопроводности. Для подземных цилиндрических резервуаров в соляных массивах размеры зоны распространения тепловой волны не превышают радиуса выработки-емкости. Необходимое для расчетов начальное распределение температуры в породе определяется на стадии геологоразведочных работ.

После создания и первоначального заполнения подземного резервуара природным газом на дне выработки-емкости остается насыщенный рассол. В процессе хранения в создавшихся в выработке-емкости термобарических условиях происходит массообмен между рассолом и природным газом. Газ диффундирует в рассол, а пары воды в природный газ. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не установится равновесие между парциальным давлением водяного пара в газовом объеме и давлением паров рассола над его поверхностью. В настоящее время для расчета условий, приводящих к образованию гидратов, принимается 100%-ое влагосодержание газа в выработке-емкости. Для определения условий гидратообразования используется методика определения температуры и давления гидратообразования по равновесным кривым.

На рис. 3 представлены результаты расчета процесса гидратообразования природного газа в скважине резервуара № 5 Ереванского ПХГ при отборе газа с постоянной производительностью 2,5 млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$ в течение 5 суток и начальном давлении в резервуаре 12,5 МПа для природного газа - 100% CH_4 .

Необходимое понижение температуры гидратообразования, К

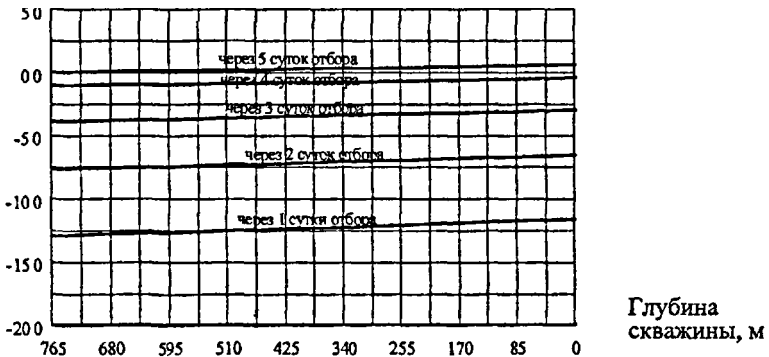


Рис.3. Необходимое понижение температуры гидратообразования по глубине скважины для разного времени с начала отбора при производительности отбора 2,5 млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$

Математическая модель, составляющая основу разработанного метода расчета режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли, позволяет рассматривать ПХГ, как единый технологический комплекс, состоящий из производного количества подземных резервуаров и скважин, соединенных шлейфами, трубопроводами и коллекторами. Кроме того, эта модель может быть использована для расчетов газодинамических и термодинамических процессов, процессов влагонасыщения и гидратообразования в скважинах, разветвленных трубопроводах, соединенных коллекторами, и наземном оборудовании других объектов газовой отрасли.

В третьей главе приведены результаты апробации метода расчета режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли.

Методика расчета режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли реализована в виде программного комплекса "Моделирование подземных хранилищ газа" (ПК МПХГ). Для выполнения необходимых для апробации расчетов с помощью ПК МПХГ была создана расчетная схема процесса отбора из Ереванского ПХГ, которая включает все подземные резервуары, скважины и наземное оборудование (трубопроводы, задвижки и т.д.) этого хранилища.

В качестве исходных данных для расчетов принимались экспериментальные данные, полученные на Ереванском ПХГ в 1986-89 г.г. При проведении эксперимента измерялись производительность отбора газа на узле замера расхода газа ПХГ и давление на газопроводе-шлейфе или устье скважины резервуара, участвовавшего в эксперименте. В течение экспериментов производительность отбора газа изменялась.

Экспериментальные данные, позволяющие исследовать режим отбора газа из одного резервуара, были получены для резервуаров №№ 1,8,13 и 19 Ереванского ПХГ. Полученные в результате моделирования с этими исходными данными расчетные значения давления на устьях скважин и газопроводах-шлейфах были сопоставлены со значениями давления, полученными экспериментально. На рис. 4 приведено изменение производительности отбора из резервуара № 1 в процессе эксперимента, а на рис. 5 сопоставлены экспериментальные и расчетные значения давления на устье скважины при отборе газа из этого резервуара. Несмотря на сложный характер изменения производительности отбора (исходных данных), при сопоставлении результатов расчетов и экспериментальных данных получено сходство расчетных и фактических значений с погрешностью, не превосходящей 5%, за исключением моментов резкого увеличения производительности отбора. Подобные отклонения при резком увеличении расхода отбора отмечает и Svein V.Taule (Statoil Gas Technology). Эти отклонения объясняются погрешностью измерений расхода и устраняются калиброванием расходомерной системы.

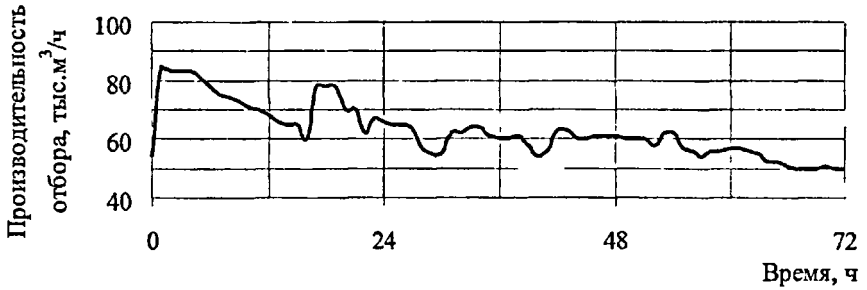


Рис. 4. Изменение производительности отбора газа из резервуара № 1.

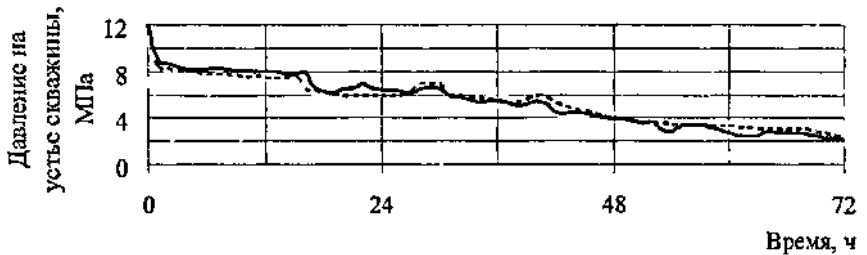


Рис. 5. Изменение давления на устье скважины резервуара № 1:
 -- экспериментальные данные; — значения, полученные в результате расчета

Полученные результаты позволяют в разработанном методе расчета режимов отбора газа в качестве исходных данных использовать параметры, определяемые непосредственно с измерительных приборов на ПХГ.

В четвертой главе рассматривается оптимизация режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли.

Выбор оптимальной конструкции эксплуатационной скважины ПХГ в каменной соли

Основные технологические параметры режима отбора газа из ПХГ в значительной степени определяются конструкциями скважин подземных резервуаров хранилища, так как отбор газа из подземного резервуара в каменной соли производится по одной эксплуатационной скважине. Эксплуатационная скважина характеризуется технологическими и стоимостными показателями, при этом основным технологическим параметром считается максимальная производительность отбора газа при заданном перепаде давлений.

Для обеспечения оптимальных режимов отбора газа при ограниченном количестве эксплуатационных скважин и высоких проектных пиковых отборах газа из ПХГ особое значение приобретает выбор конструкции скважины, обеспечивающей максимальную производительность отбора при допустимом темпе падения давления в подземном резервуаре.

С помощью разработанного метода расчета режимов отбора газа были исследованы три конструкции эксплуатационных скважин, наиболее часто используемые на ПХГ в отечественной и зарубежной практике: с основными обсадными колоннами труб диаметром 245, 299 и 340 мм, соответствующими им внешними подвесными эксплуатационными колоннами труб диаметром 178, 219 и 245 мм и центральными подвесными эксплуатационными колоннами труб диаметром 114, 146 и 178 мм.

В работе предложено понятие коэффициента эффективности использования скважины, представляющего собой удельную стоимость скважины на единицу максимальной производительности отбора газа, т.е. $K_c = C/Q_{max}$ (8), где C - стоимость создания эксплуатационной скважины, руб.; Q_{max} - максимальная производительность отбора газа из скважины, млн. $\text{м}^3/\text{сутки}$.

Изменение коэффициента эффективности использования скважины в зависимости от ее диаметра и начального давления в подземном резервуаре для конструкции скважин с извлеченными центральными подвесными эксплуатационными колоннами труб представлено на рис.6.

K_c , руб.·сутки/ м^3



Рис. 6. Изменение коэффициента K_c при разных наружных диаметрах эксплуатационной колонны: \diamond - начальное давление в резервуаре 9,0 МПа; \square - начальное давление в резервуаре 15,0 МПа; $+$ - начальное давление в резервуаре 21,0 МПа.

Анализ графиков показывает, что коэффициент K_c изменяется практически линейно, уменьшаясь при увеличении диаметра эксплуатационной колонны труб и начального давления в подземном резервуаре.

Предложенная в работе математическая зависимость основных технологических и экономических характеристик эксплуатационной скважины подземного резервуара от ее диаметра и начального давления в подземном резервуаре позволяет сделать вывод о том, что увеличение наружного диаметра (в реально используемом на практике диапазоне) основных обсадных колонн эксплуатационных скважин ПХГ приводит к снижению удельной стоимости скважины на единицу максимальной производительности отбора газа.

Алгоритм оптимизации режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли, состоящего из единичного подземного резервуара или группы подземных резервуаров.

Режим отбора газа из ПХГ характеризуется рядом параметров, на которые накладываются ограничения и связи. Если ограничения и связи таковы, что позволяют однозначно определить значения всех параметров, то говорят о задаче прямого расчета технологических параметров. Однако в практике эксплуатации ПХГ встречаются различные сочетания параметров и управляющих воздействий (схемы работы ПХГ), обеспечивающие работу ПХГ и удовлетворяющие ограничениям и связям. В этом случае говорят об оптимизационной задаче с выделением целевой функции и критерия оптимизации, определяющего минимум или максимум этой функции.

Задача параметрической оптимизации имеет следующую постановку.

Обозначим x_1, x_2, \dots, x_n - параметры ПХГ, которые можно изменять в процессе оптимизации для обеспечения заданного качества. На каждый параметр могут накладываться ограничения вида $x_{j, \min} \leq x_j \leq x_{j, \max}, j = 1, \dots, n$ (9). Пусть также $Q_1(x), Q_2(x), \dots, Q_m(x)$ - показатели (критерии) качества, вычисляемые в результате расчета отбора газа при заданных значениях параметров. Требование к каждому из критериев будем задавать в виде ограничений $Q_{i, \min} \leq Q_i(x) \leq Q_{i, \max}, i = 1, \dots, m$ (10), где m - число частных критериев, n - число оптимизируемых параметров.

Задачу параметрической оптимизации сформулируем следующим образом: найти вектор параметров $x^* = [x_1^*, \dots, x_n^*]^T$, удовлетворяющий ограничениям (9), при котором показатели качества удовлетворяют ограничениям (10).

После нормировки частных критериев в виде

$$q_i(x) = \begin{cases} 0, Q_{i, \min} \leq Q_i(x) \leq Q_{i, \max}, \\ \frac{Q_i(x) - Q_{i, \max}}{Q_{i, \max} - Q_{i, \min}}, Q_i(x) > Q_{i, \max}, \\ \frac{Q_{i, \min} - Q_i(x)}{Q_{i, \max} - Q_{i, \min}}, Q_i(x) < Q_{i, \min}. \end{cases}$$

происходит переход от нескольких частных критериев q_1, \dots, q_m в один общий критерий, который формируется в виде функции частных критериев (свертывание критериев). В результате получаем общий критерий качества (целевую функцию) в форме

$$\varphi_p(q_1, \dots, q_m) = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_i^p \right]^{1/p}, \quad (12)$$

где при $p = 0, 1, 2$ и ∞ имеем мультипликативный (среднегеометрический), аддитивный, квадратичный и минимаксный критерий, соответственно.

Решение задачи параметрической оптимизации реализовано в ПК МПХГ в виде итерационной процедуры, цель которой - сведение общего критерия качества (12) к нулю. Общий критерий качества вычисляется по результатам расчета режимов отбора газа с использованием методов прямого поиска:

- алгоритма деления шага пополам при одном оптимизируемом параметре ($b=1$) и алгоритма преобразований матрицы направлений при $n > 1$;
- алгоритма квадратичной интерполяции при одном оптимизируемом параметре ($b=1$) и алгоритма преобразований вращения и растяжения-сжатия ($n > 1$);
- метода "деформируемого многогранника" Нелдера и Мида.

В ходе расчета промежуточная информация о критериях и оптимизируемых параметрах выводится на экран. Расчет продолжается либо до окончания очередного этапа, либо прерывается расчетчиком досрочно. Корректировка задания заключается в изменении набора оптимизируемых параметров и/или пределов в ограничениях.

Разработанная методика оптимизации позволяет решать конкретные оптимизационные задачи отбора газа из единичного подземного резервуара (табл.1).

Таблица 1.

Варианты оптимизационных задач при отборе газа из единичного подземного резервуара

№ варианта	Целевая функция	Параметр оптимизации	Критерии оптимизации			Управляющее воздействие на резервуар	Тип задвигки на резервуаре	
			$t_{отб} \geq \tau$	$P_{рез} \geq P_{min}$	$G_{инг} \rightarrow min$		регулируемая	нерегулируемая
1	$Q \rightarrow max, t_{отб} \geq \tau$	Q	+	+		$\Delta P_{заде}$	+	
2	$V_{отб} \rightarrow V_{max}, t_{отб} \rightarrow min$	Q		+		$\Delta P_{заде}$	+	
3	$V_{отб} \rightarrow V_{max}, t_{отб} \rightarrow min$	$P_{заде}$		+		$\Delta P_{заде}^{нач.}$		+
4	$Q \rightarrow max, t_{отб} \geq \tau, G_{инг} \rightarrow min$	Q	+	+	+	$\Delta P_{заде}$	+	
5	$V_{отб} \rightarrow V_{max}, t_{отб} \rightarrow min, G_{инг} \rightarrow min$	Q		+	+	$\Delta P_{заде}$	+	
6	$V_{отб} \rightarrow V_{max}, t_{отб} \rightarrow min, G_{инг} \rightarrow min$	$P_{заде}$		+	+	$\Delta P_{заде}^{нач.}$		+

В таблице 1: Q — расход отбора, млн.нм³/сутки; $t_{отб}$ — продолжительность отбора, сутки; τ — заданный период отбора, сутки; $\Delta P_{заде}$ — перепад давления на задвигке (для регулируемой задвигки), Па; $\Delta P_{заде}^{нач.}$ — начальный перепад давления на задвигке (для нерегулируемой задвигки), Па; $V_{отб}$ — отобранный объем газа, нм³; $G_{инг}$ — расход ингибитора, кг/ч.

Для реализации предложенной методики оптимизации для отбора газа из группы подземных резервуаров были рассмотрены различные варианты распределения расхода внутри группы резервуаров (рис.7).

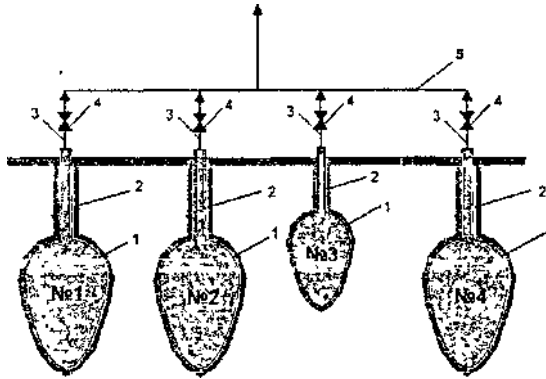


Рис.7. Принципиальная технологическая схема эксплуатации группы из 4 резервуаров: 1 - подземный резервуар; 2 - технологическая скважина; 3 - газопровод-шлейф; 4 - регулируемая задвижка, 5 - коллектор.

В первом варианте с помощью регулируемых задвижек, установленных на газовых шлейфах до входа в коллектор, поддерживался одинаковый расход отбора для каждого подземного резервуара с помощью изменения проходного сечения регулируемой задвижки. В этом случае заданная суммарная производительность группы исследовавшихся подземных резервуаров поддерживалась только в течение 4,7 суток.

Во втором варианте отбор газа из группы подземных резервуаров происходил без регулирования расхода газа до входа в коллектор. В этом случае единичные расходы устанавливаются в соответствии с объемной долей отдельных подземных резервуаров. С этим распределением расходов газ отбирался при заданном значении суммарной производительности более длительное время, чем в первом варианте - в течение 6.15 суток.

В третьем варианте с помощью регулируемых задвижек, установленных на газовых шлейфах до входа в коллектор, поддерживался отбор из i -го подземного резервуара, пропорциональный разности между давлением в этом резервуаре и средним значением давления в хранилище (13), и в отборе участвовали подземные резервуары, давление в которых больше или равно среднему значению давления в хранилище. Этот вариант позволил увеличить отбор газа на 7% по сравнению с принятым сейчас на практике вторым вариантом распределения отбора, когда регулирующие задвижки на подземных резервуарах полностью открыты, то есть расход не регулируется до входа в коллектор.

$$Q_i = K_i(P_i - P_{\text{сред}}); \quad P_{\text{сред}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (13)$$

где $P_{\text{сред}}$ - среднее значение давления в хранилище, Па; P_i - давление в i -ом подземном резервуаре, Па; n - количество подземных резервуаров в составе ПХГ; V_i - объем i -го подземного резервуара, м^3 ; Q_i - отбор из i -го подземного резервуара, $\text{млн.}\text{нм}^3/\text{сутки}$; K_i - коэффициент пропорциональности, $\text{млн.}\text{нм}^3/(\text{сутки}\cdot\text{Па})$.

Далее с использованием этого варианта распределения расхода газа внутри группы резервуаров решаются задачи оптимизации режимов отбора газа из группы подземных резервуаров (табл. 2), аналогичные задачам, рассмотренным для единичного подземного резервуара.

Таблица 2

Варианты оптимизационных задач при отборе газа из группы подземных резервуаров

№ варианта	Целевая функция	Параметр оптимизации	Критерий оптимизации			Управляющее воздействие на резервуаре	Подключенные резервуары	Тип задвижки на резервуаре		Расход из единичного резервуара
			$t_{\text{отб}} \geq \tau$	$P_{\text{рез}} \geq P_{\text{мин}}$	$G_{\text{инг}} \rightarrow \min$			регулируемая	нерегулируемая	
1	$Q_{\Sigma} \rightarrow \max, t_{\text{отб}} \geq \tau$	Q_{Σ}	+	+		$\Delta P_{\text{заде}}$	$P_i \geq P_{\text{сред}}$	+		$K_i(P_i - P_{\text{сред}})$
2	$V_{\text{отб}} \rightarrow V_{\text{max}}, t_{\text{отб}} \rightarrow \min$	Q_{Σ}		+		$\Delta P_{\text{заде}}$	$P_i \geq P_{\text{сред}}$	+		$K_i(P_i - P_{\text{сред}})$
3	$Q_{\Sigma} \rightarrow \max, t_{\text{отб}} \geq \tau, G_{\text{инг}} \rightarrow \min$	Q_{Σ}	+	+	+	$\Delta P_{\text{заде}}$	$P_i \geq P_{\text{сред}}$	+		$K_i(P_i - P_{\text{сред}})$
4	$V_{\text{отб}} \rightarrow V_{\text{max}}, t_{\text{отб}} \rightarrow \min, G_{\text{инг}} \rightarrow \min$	Q_{Σ}		+	+	$\Delta P_{\text{заде}}$	$P_i \geq P_{\text{сред}}$	+		$K_i(P_i - P_{\text{сред}})$

В таблице 2: Q_{Σ} - суммарная производительность отбора из группы подземных резервуаров, $\text{млн.}\text{нм}^3/\text{сут}$; $Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i$, $i=1, \dots, n$ и n - количество подключенных резервуаров).

Алгоритм оптимизации режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли, состоящего из единичного подземного резервуара или группы подземных резервуаров, показан на рис. 8.

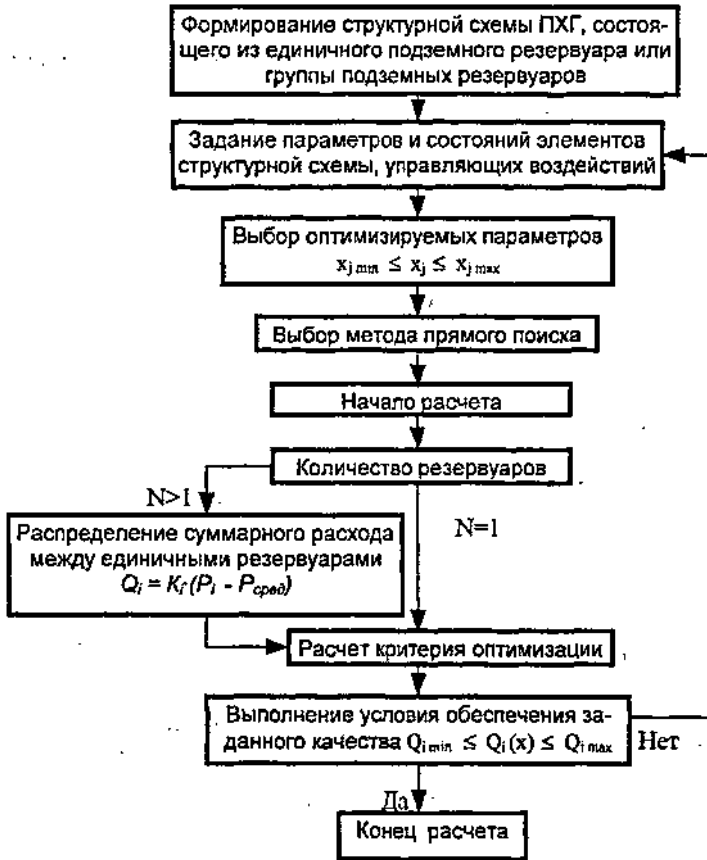


Рис.8. Алгоритм оптимизации режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли, состоящего из единичного подземного резервуара или группы подземных резервуаров.

Внедрение алгоритма оптимизации для отбора газа из группы резервуаров позволяет за счет использования оптимальной схемы распределения суммарной производительности отбора газа между единичными резервуарами увеличить продолжительность отбора газа из ПХГ. Для отбора газа из четырех резервуаров общим геометрическим объемом 1,2 млн. м³ (рис. 7) при суммарном расходе отбора 19,2 млн. м³/сутки продолжительность отбора увеличивается с 6,15 до 6,58 суток. При этом дополнительно будет извлечено 8,256 млн. м³ газа. Удельный показатель экономии в виде чистой прибыли от реализации 1000 м³ газа - 310 руб./ 1000 м³. Эффект от увеличения отбора газа из этой группы резервуаров - 2559,36 тыс. руб. Чистый доход от реализации извлеченного дополнительно газа при ставке на-

лога на прибыль 24% - 1945,11 тыс. руб. Таким образом, использование предложенного метода оптимизации позволяет получить значительную прибыль за счет выбора наиболее эффективных режимов отбора.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Разработан метод расчета режимов отбора газа из подземного хранилища в каменной соли, основанный на численном решении систем нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений, описывающих процесс эксплуатации подземного хранилища, и использующий структурное моделирование.

2. Обоснована конструкция эксплуатационной скважины подземного резервуара с наименьшей удельной стоимостью скважины на единицу максимальной производительности отбора.

3. Обоснована оптимальная схема распределения суммарной производительности отбора газа между единичными резервуарами подземного хранилища в каменной соли, состоящего из произвольного количества резервуаров.

4. Разработан метод оптимизации режимов отбора газа из подземного хранилища, состоящего из единичного резервуара или группы резервуаров, который заключается в решении задачи параметрической оптимизации методами прямого поиска с использованием оптимальной схемы распределения суммарной производительности отбора газа между единичными резервуарами в группе резервуаров.

5. Разработанные методики расчета и оптимизации режимов отбора газа реализованы в виде программного комплекса для ПЭВМ "Моделирование подземных хранилищ газа" (ПК МПХГ).

6. Разработанные методики расчета и оптимизации режимов отбора газа, реализованные в ПК МПХГ, использованы при создании завершенных и принятых к строительству проектов двух подземных хранилищ природного газа - Волгоградского и Калининградского ПХГ, а также при эксплуатации Ереванского ПХГ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Игошин А.И., Пышков Н.Н., Зайцев В.Г. Составить алгоритм и вычислительную программу расчета эксплуатационных параметров технологических скважин ПХГ и выработать рекомендации по выбору их оптимальных конструктивных решений. Фонды ООО "Подземгазпром". М., 1996. - 68 с.

2. Зайцев В.Г., Казарян В.А., Козлов О.С., Ходаковский В.В. Структурное моделирование динамики подземных газовых хранилищ: Тез. докл. Вторая Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России "Новые технологии в газовой промышлен-

ности". Секция 7 "Моделирование, автоматизация и управление в газовой промышленности". - М.: РГУ нефти и газа, 1997. - С. 17-18

3. Зайцев В.Г., Игошин А.И., Пышков Н.Н., Ходаковский В.В. Разработать алгоритм и программу расчета процессов гидратообразования и влагонасыщения природного газа при его отборе из подземных резервуаров в каменной соли. Фонды ООО "Подземгазпром", М., 1998. - 76 с.

4. Зайцев В.Г., Ходаковский В.В. Расчеты термодинамических параметров при эксплуатации ПХГ в каменной соли: Тез. докл. Третья Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России "Новые технологии в газовой промышленности". Секция 7 "Моделирование, автоматизация и управление в газовой промышленности". - М.: РГУ нефти и газа, 1999. - С.3

5. Зайцев В.Г., Игошин А.И., Ходаковский В.В., Козлов О.С. Моделирование подземных хранилищ газа// Газовая промышленность. - 1999. - №9. - С.33-34

6. Зайцев В.Г., Игошин А.И., Ходаковский В.В. Разработать автоматизированный программный комплекс для расчетов режимов эксплуатации подземных хранилищ газа в каменной соли на основе программы "Моделирование подземных хранилищ газа в каменной соли". Фонды 0 0 0 "Подземгазпром". М., 1999. - 51 с.

7. Горифьянов В.И., Зайцев В.Г., Игошин А.И., Пышков Н.Н. Сертифицировать и апробировать автоматизированный программный комплекс "Моделирование подземных хранилищ газа в каменной соли", оптимизировать расчеты режимов эксплуатации подземных хранилищ газа с его использованием. Фонды 0 0 0 "Подземгазпром". М., 2000. - 56 с.

8. Богданов Ю.М., Зайцев В.Г., Игошин А.И., Чумиков Н.Н. Выбор конструкции скважины ПХГ в каменной соли// Газовая промышленность. - 2002. - №4. - С.60-62

9. Игошин А.И., Зайцев В.Г., Пышков Н.Н. Определение вместимости подземных резервуаров в солях в процессе их эксплуатации// Наука и техника в газовой промышленности. — 2002. - №4. - С.9-12

Подписано в печать **19 04. 2004 г.**
Тираж **100** экз Заказ № **39**
ООО «Техполиграфцентр» ПЛД № 53-477.

Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. **1,0**
Тел./факс: (095) 151-26-70

3

№ 11625

465