

На правах рукописи



ДОРОХИН ВЛАДИМИР ГЕННАДЬЕВИЧ

**МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В
РАЗЛИЧНЫХ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЯХ НА ПОДЗЕМНЫХ
ХРАНИЛИЩАХ ГАЗА**

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:

Максимов Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ФГБУН ИПНГ РАН), заведующий лабораторией;

Голод Гарри Савельевич, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по производству ООО «Газпром ПХГ».

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ).

Защита диссертации состоится «17» мая 2017 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 511.001.01, созданного на базе 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 подземном хранении газа активный объем газа закачивается и отбирается сезонно, в то время как буферный объем газа (доля в пласте составляет порядка 50-55% от общего объема хранимого газа) не извлекается в процессе эксплуатации и используется для обеспечения поддержания давления в пласте и предотвращения обводнения эксплуатационного фонда скважин. Как правило, активный объем состоит из природного метанового газа, в то время как буферный объем может включать другие, менее ценные углеводородные газы. При этом капитальные вложения в создание газохранилища могут быть существенно уменьшены.

В связи с вступлением России в новое глобальное климатическое Парижское соглашение, захоронение CO_2 позволит повысить практику углеродного регулирования, получив возможность не покупать квоты на выбросы CO_2 в атмосферу.

Таким образом, совершенствование технологий частичного замещения буферного объема газа в ПХГ углекислым газом и его захоронения в пористой среде является актуальной задачей.

Целью работы является совершенствование технологий частичного замещения буферного объема газа в ПХГ углекислым газом, а также его захоронения за счет использования сверхкритического и жидкого агрегатных состояний CO_2 для повышения их технологической эффективности.

Задачи исследования

1. Анализ мирового опыта по замещению части буферного объема подземного хранилища природного газа углекислым газом и его захоронению.
2. Анализ физических особенностей агрегатных состояний CO_2 оптимальных для замещения части буферного объема природного газа и захоронения CO_2 .

3. Численное исследование процессов, протекающих в пласте-коллекторе в результате закачки газообразного CO_2 .
4. Численное исследование процессов, протекающих в пласте-коллекторе в результате закачки сверхкритического CO_2 .
5. Численное исследование процессов, протекающих в пласте-коллекторе в результате закачки жидкого CO_2 .

Научная новизна

Автором изучены процессы, протекающие в пласте-коллекторе при закачке газообразного, сверхкритического и жидкого CO_2 в пористую среду. Результаты исследований позволяют обосновать выбор сверхкритического агрегатного состояния CO_2 для замещения части буферного объема природного газа на подземных хранилищах газа и жидкого агрегатного состояния CO_2 для захоронения.

На основе результатов, полученных на одномерной математической модели, выявлено влияние фильтрационно-емкостных параметров, угла наклона пласта-коллектора на формирование зоны смешения «углекислый газ-метан». Также выявлено влияние глубины пласта-коллектора на фазовое состояние CO_2 . Установленные закономерности позволяют определить критерии выбора объекта подземного хранения газа для детального гидродинамического моделирования замещения части буферного объема природного газа.

Впервые для Кущевского ПХГ по результатам гидродинамического моделирования процесса закачки неуглеводородных газов обоснован наиболее эффективный агент для реализации способа частичного замещения буферного объема природного газа.

Впервые для Даньковской водоносной структуры по результатам гидродинамического моделирования обоснован способ захоронения CO_2 с последующим его хранением в жидком агрегатном состоянии.

Методология и методы диссертационного исследования

В ходе проведения диссертационного исследования применялись методы теоретического и эмпирического познания, заключающиеся в анализе использования CO_2 в качестве буферного объема газа, а также его захоронения, в применении математического моделирования для оценки влияния фильтрационно-емкостных свойств, угла наклона пласта-коллектора на зону смешения «углекислый газ-метан», в использовании компьютерного моделирования для детального изучения процессов, протекающих в пласте-коллекторе в результате закачки неуглеводородных газов на примере Кущевского ПХГ и Даньковской водоносной структуры.

Защищаемые положения

1. Обоснование требований, предъявляемых к выбору основных параметров пласта-коллектора, влияющих на формирование зоны смешения «углекислый газ-метан» и фазовое состояние CO_2 .
2. Способ замещения части буферного объема природного газа на ПХГ CO_2 , находящегося в сверхкритическом агрегатном состоянии.
3. Способ хранения CO_2 в жидком агрегатном состоянии в геологической структуре.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность и обоснованность выводов, полученных в результате исследования, подтверждается применением современных методов и методик сбора, обработки и обобщения информации, анализом результатов исследования российских и зарубежных исследователей, использованием стандартизированных математических методов, сертифицированных пакетов компьютерных программ для численных расчетов и визуализации результатов (MATLAB) и гидродинамического моделирования (Tempest MORE 7.1).

Результаты исследований в достаточной степени освещены в печатных изданиях и апробированы на научных конференциях.

Практическая и теоретическая ценность

Автором решена задача, имеющая существенное значение для подземного хранения газа, а также защиты окружающей среды. Исследования, представленные в диссертационной работе, обосновывают использования различных агрегатных состояний CO₂ для замещения части буферного объема природного газа и захоронения CO₂.

Созданные и научно обоснованные технические решения могут быть эффективно использованы на ПХГ, а также объектах, предназначенных для захоронения CO₂.

Апробация работы

Основные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на:

- Совещании по вопросам рассмотрения возможностей создания и использования для нужд ОАО «Газпром» мощностей ПХГ на территории Словакии, 2014, Москва;
- VI-ой открытой научно-технической конференции молодых специалистов и работников «Молодежь + Наука = Развитие нефтегазовой отрасли», 2015, Астрахань;
- 26-ой Международной газовой Конференции «Program of competition in honour of 100th anniversary of Underground Gas Storage», 2015, Париж;
- Заседании Молодежного Ученого Совета ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2016, Москва;
- XX-ой Международной научно-практической конференции «Реагенты и материалы для строительства, эксплуатации и ремонта нефтяных, газовых скважин: производство, свойства и опыт применения. Экологические аспекты нефтегазового комплекса», ООО «Аркаим», 2016, Владимир;
- VIII-ой научно-технической конференции молодых специалистов ООО «Газпром ПХГ», 2016, Москва;

- Внутренней молодежной научно-практической конференции ООО «Газпром ВНИИГАЗ» «Инновации сегодня и завтра: миссия молодых ученых», 2016, Москва.

Публикации

Основное содержание диссертационной работы изложено автором в 8-и публикациях, в т.ч. в 3-х статьях в журналах входящих в «Перечень...» ВАК Минобрнауки РФ и в одном патенте на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников из 55 наименований. Общий объем работы составляет 119 печатных страниц. Текст работы содержит 72 рисунка и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы диссертационной работы, определены цель работы, степень достоверности результатов проведенных исследований, методы диссертационного исследования, сформулированы задачи исследований, научная новизна, защищаемые положения, практическая и теоретическая значимость проведенных автором исследований и их апробация.

В первой главе автором анализируется мировой опыт использования CO_2 в качестве буферного объема газа, а также его захоронения. Показано, что технико-экономическая эффективность от замещения части буферного объема природного газа CO_2 определяется качеством извлекаемой продукции при отборе, установленным требованием нормативных документов, в то время как для захоронения CO_2 – объемом хранимого CO_2 . Отмечается большой вклад зарубежных и российских ученых в изучение вопросов, связанных с частичной заменой буферного объема газа на CO_2 : Andibert A., Barbier J., Bonijoly D., Cailly B., Egermann P., Cotiche C., Herbrich V.F., Kervevan C., Longague X., Matray J.M., Menjoz A., Robeling C., Thlerry D., Vidal-Gilbert S., Бузинов С.Н., Гарайшин А.С., Дмитриевский А.Н.,

Карвацкий А.Г., Кожевников А.А., Левыкин Е.В., Михайловский А.А., Хан С.А. и др. Вопросами захоронения CO₂ занимались Andre L., Azaroual M., Bachu S., Chang S.G., Huang H.P., Kervevan C., Lombard J.M., Menjoz A., Лисичкин Г.В., Сафонов М.С., Хан С.А. и др.

Основными причинами снижения качества извлекаемой продукцией в процессе эксплуатации ПХГ являются обширные зоны смешения «CO₂-CH₄», а также прорыв углекислого газа в зону эксплуатационного фонда скважин. Это происходит из-за образования депрессионных воронок в результате отбора активного объема газа из ПХГ и высокой степени неоднородности пласта-коллектора. Поэтому в период отбора происходит увеличение концентрации CO₂ в извлекаемой продукции.

Автором проанализировано применение различных технологических решений по замещению части буферного объема газа на CO₂, а также его захоронению. Отмечено, что предлагалось замещать часть буферного объема газа CO₂ в газообразном агрегатном состоянии и хранить CO₂ на дне океанов в сверхкритическом и жидком агрегатных состояниях. А. Obdam, С.М. Oldenburg, А.А. В. Van der Meer, А.А. Михайловский и др. моделировали замещение части буферного объема газа CO₂, находящегося в газообразном агрегатном состоянии.

Отмечается, что впервые в практике ПХГ компанией Gaz De France был опробован метод частичного замещения буферного объема газа неуглеводородным газом. Общий объем хранилища Сэн-Клер-Сюр-Эпт составляет 600 млн м³. Специалисты компании Gaz De France решили заменить 20% объема буферного природного газа неуглеводородным газом, состоящим преимущественно из азота (90%) и CO₂ (10%). В 1981 году неуглеводородный газ прорвался к скважине Vn 18. Однако замер пробы в данной скважине показал пренебрежительно малую долю CO₂ в отобранном газе.

Проведенный выше анализ дает основание полагать, что вопросы, связанные с обоснованием агрегатного состояния CO_2 в пласте-коллекторе, требуют дополнительного исследования.

Во второй главе представлено обоснование выбора агрегатного состояния CO_2 , а также глубины залегания геологического объекта, способного поддерживать CO_2 в определенном агрегатном состоянии.

В пластовых условиях CO_2 может находиться в различных агрегатных состояниях в зависимости от температуры и давления: жидком, газообразном, сверхкритическом.

Обобщая проанализированные в диссертационной работе исследования физических свойств CO_2 , автором установлено следующее.

Для замещения части буферного объема хранимого природного газа на CO_2 наиболее подходит жидкое агрегатное состояние CO_2 , поскольку в этом случае требуются большие объемы жидкого CO_2 , а также при закачке жидкого CO_2 теряется полезный газопаровой объем, что приведет к уменьшению емкости ловушки. Жидкий CO_2 больше подходит для захоронения, так как он будет находиться в более компактном состоянии в пласте, то есть можно хранить большие объемы жидкого CO_2 , чем газообразного и сверхкритического.

Для частичного замещения буферного объема углеводородного газа CO_2 больше подходит сверхкритическое агрегатное состояние, чем газообразное, так как огромное значение будет иметь гравитационное разделение метана и сверхкритического CO_2 . Под действием гравитационных сил CO_2 будет опускаться под метан и продвигать его к забоям добывающих скважин. Так же скорость фильтрации у сверхкритического CO_2 меньше, чем у газообразного CO_2 из-за большей вязкости сверхкритического CO_2 . Этот фактор позволит избежать раннего прорыва CO_2 к фону эксплуатационных скважин, что позволит продлить их эксплуатацию без примеси CO_2 в скважинной продукции.

В работе разработана методика выбора пласта-коллектора, способного поддерживать CO_2 в нужном агрегатном состоянии.

Глубина залегания пласта-коллектора выбирается исходя из необходимого агрегатного состояния углекислого газа для замещения части буферного объема газа или захоронения CO_2 . Продемонстрируем определение глубины перехода CO_2 из одной фазы в другую, построив стандартное распределение температуры и давления в зависимости от глубины. Далее накладываем получившуюся траекторию распределения температуры и давления на фазовую диаграмму. Получаем значения давления и температуры, соответствующие фазовому переходу CO_2 , и уже по ним определяем глубину перехода CO_2 из одного агрегатного состояния в другое. Из рисунка 1 видно, что при принятых условиях на глубине залегания до 600 метров условия соответствуют газообразному CO_2 , от 600 до 1000 метров – жидкому CO_2 , от 1000 метров и более – сверхкритическому CO_2 .

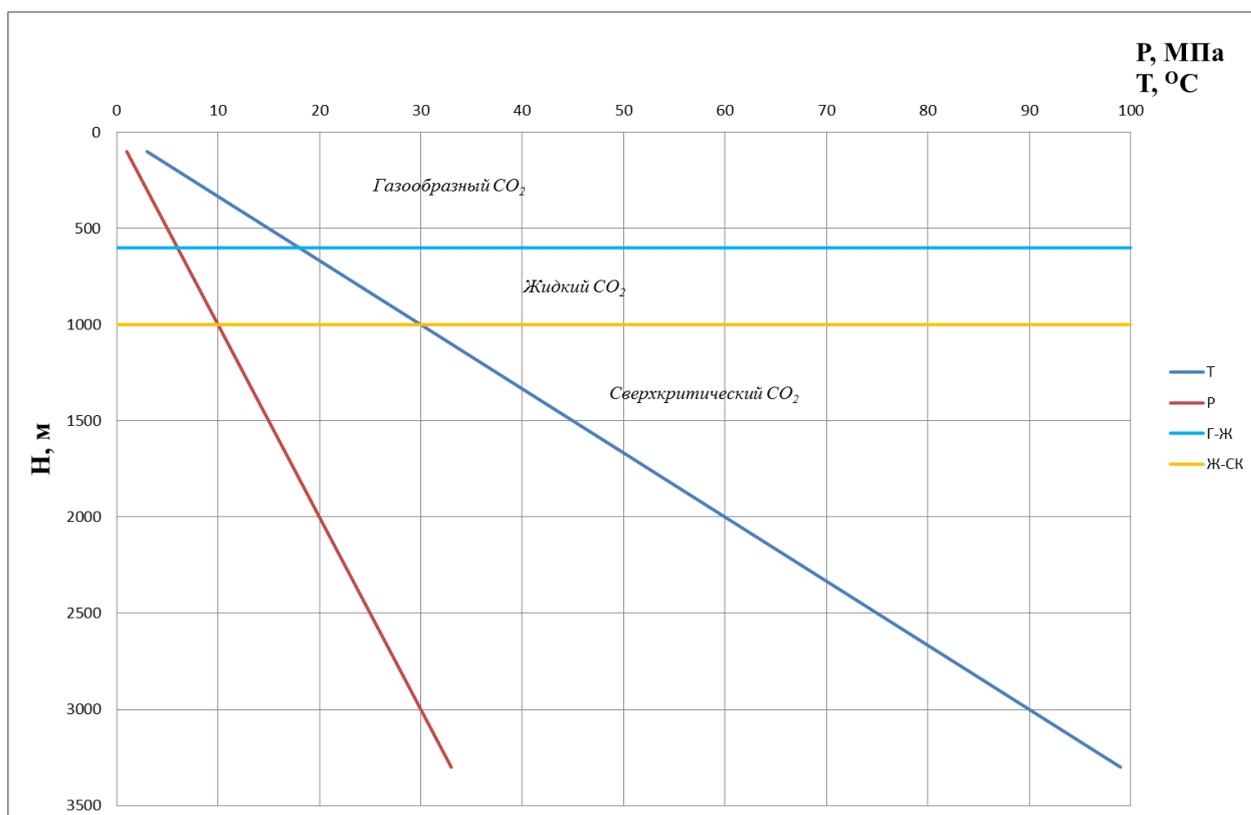


Рис. 1 – Агрегатное состояние CO_2 в зависимости от глубины залегания пласта-коллектора.

В диссертационной работе построены зависимости распределения плотности, вязкости CO_2 от глубины при стандартном распределении температуры и давления по пласту-коллектору. Если в пласте присутствуют зоны многолетних мерзлых пород и аномальных давлений (температур), то приведенные зависимости должны быть скорректированы с их учетом.

В третьей главе представлены результаты исследований процессов, происходящих в пласте-коллекторе при закачке CO_2 в газообразном и сверхкритическом агрегатных состояниях.

В работе решается задача о нахождении распределения концентрации закачиваемого компонента в объекте хранения, решение которой позволит определить зону смешения компонентов « $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ », а также позволит корректно спрогнозировать объем отбора метана без примеси CO_2 в зоне эксплуатационных скважин, так как изменение состава добываемой продукции влияет на скважинное оборудование, цементный камень, комплекс подготовки и очистки газа и т. д.

В пласт-коллектор, первоначально насыщенный природным газом, производится закачка углекислого газа в газообразном и сверхкритическом агрегатных состояниях. Предполагается, что скорость фильтрации газов подчиняется закону Дарси в традиционной форме, вязкость зависит от давления. Пористая среда считается недеформируемой и изотропной.

Фильтрация смеси двух газов в одномерном случае с учетом диффузионного потока описывается следующими уравнениями, представленными в работе В.М. Максимова¹:

$$\rho \left(m \frac{\partial c_i}{\partial t} + w \text{grad} C_i \right) + \text{div} J_i = 0 \quad (i = 1, 2), \quad (1)$$

$$w = -\frac{k}{\mu} \text{grad} P, \quad (2)$$

$$J_i = -\rho D_{12} \text{grad} C_i \quad (i = 1, 2), \quad (3)$$

$$D_{12} = m\beta D_m + \lambda w, \quad (4)$$

¹Максимов В.М. Основы гидродинамики пластовых систем. – М.: Недра, 1994 – 201 с.

где t – время; P – давление; ρ – плотность; C_i, J_i – концентрация, массовый диффузионный поток i -го компонента; w – скорость фильтрации смеси; m – пористость; D_{12} – коэффициент бинарной диффузии; D_m – коэффициент молекулярной диффузии; β – коэффициент извилистости; λ – параметр продольного рассеивания пористой среды.

Цель данной главы состоит в том, чтобы показать влияние физических параметров сверхкритического и газообразного состояний CO_2 на зону смешения « CH_4 - CO_2 ». Таким образом, можно пренебречь коэффициентом бинарной диффузии D_{12} . Данный коэффициент применяется для адаптации расчетных значений параметров зоны смешения к фактическим значениям.

Тогда, из уравнения двухфазной фильтрации, предполагая, что относительная фазовая проницаемость распределяется по диагонали, получаем модель вытеснения двух газов с учетом силы тяжести, основанной на законе Дарси для каждой фазы и уравнении неразрывности. Данная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} m \frac{\partial c_i \rho_i}{\partial t} + \rho_i w_i \frac{\partial c_i}{\partial x} = 0 \\ w_i = -\frac{k}{\mu_i} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \rho_i g \sin \alpha \right) \end{cases} (i = 1, 2), \quad (5)$$

Тогда для каждого компонента получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{\partial c \rho_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k c \rho_1}{\mu_1} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_1 g \sin \alpha \right) \right) \\ m \frac{\partial (1-c) \rho_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k (1-c) \rho_2}{\mu_2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_2 g \sin \alpha \right) \right) \end{cases}, \quad (6)$$

где x – координата, м; t – время, с; $p = p(x, t)$ – давление в пласте, МПа; $c = c(x, t)$ – концентрация CO_2 в пласте, соответственно $(1 - c)$ – концентрация природного газа в пласте, д.ед.; $\rho_1 = \rho(p)$ – плотность CO_2 , кг/м³; $\rho_2 = \rho(p)$ – плотность природного газа, кг/м³; $\mu_1 = \mu(p)$ – вязкость CO_2 , мПа*с; $\mu_2 = \mu(p)$ – вязкость природного газа, мПа*с; m – пористость пласта, д.ед.; k – коэффициент проницаемости пласта, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; α – угол наклона пласта к горизонтали, градусы.

Плотность компонентов вычисляется по формуле:

$$\rho_i = \rho_{ci} \frac{pT_c}{p_c z_i T}, \quad (7)$$

Функции $z_i(p)$ в некотором приближении можно считать линейными:

$$z_i = a_i p + b_i, \quad (8)$$

Система уравнений после упрощений:

$$\begin{cases} m\gamma \frac{\partial p}{\partial t} = z_2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kp}{z_2 \mu_2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_2 g \sin \alpha \right) \right) + q^*, \\ \frac{\partial c}{\partial t} = A \frac{\partial c}{\partial x} + Bc \end{cases}, \quad (9)$$

где

$$q^* = z_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kpc}{z_1 \mu_1} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_1 g \sin \alpha \right) \right) + z_2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kpc}{z_2 \mu_2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_2 g \sin \alpha \right) \right), \quad (10)$$

$$\gamma = \gamma(p, c) = \frac{cb_1}{z_1} + \frac{(1-c)b_2}{z_2}, \quad (11)$$

$$A = \frac{k}{m\mu_1} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_1 g \sin \alpha \right), \quad (12)$$

$$B = \frac{z_1}{mp} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kpc}{z_1 \mu_1} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_1 g \sin \alpha \right) \right) - \frac{b_1}{z_1 mp} \left(\frac{z_2}{\gamma} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kpc}{z_2 \mu_2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_2 g \sin \alpha \right) \right) + \frac{q^*}{\gamma} \right). \quad (13)$$

Таким образом, была получена система уравнений (9) для нахождения давления и концентрации. Данные уравнения рассматриваются в области $D = \{(x, t): 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T_{max}\}$.

В левый конец пласта $x=0$ происходит закачка газа 1 (CO_2) с фиксированным дебитом q , поэтому имеем следующие граничные условия:

$$c_1(0, t) = 1, \quad (14)$$

$$\rho_1 w_1(0, t) = q. \quad (15)$$

Правый конец $x=L$ закрытый, поэтому

$$c_2(L, t) = 0, \quad (16)$$

$$w_2(L, t) = 0. \quad (17)$$

В итоге получили смешанную задачу. Эта задача решается численно конечно-разностным методом. На каждом слое сначала находится давление из первого уравнения системы (9), потом оно используется для нахождения

концентрации из второго уравнения системы (9), после чего осуществляется переход к следующему слою. Для первого уравнения системы (9) строится неявная схема. Для подсчета значений γ и q^* берутся концентрация и давление на предыдущем слое. Второе уравнение системы (9) решается по явной схеме «уголок против потока». Данный алгоритм разработан Азизом Х., Сеттари Э. и использован автором диссертационной работы.

Для обоснования более приемлемого агрегатного состояния были выбраны условные модельные объекты подземного хранения газа с термобарическими параметрами, характерными для газообразного и сверхкритического CO_2 . А именно, с одинаковыми температурами ($T_{\text{пл}}=35^\circ\text{C}$) и фильтрационно-емкостными свойствами пласта ($m=0,1$, $k=100$ мД), но с различными начальными пластовыми давлениями, соответствующими для данных агрегатных состояний CO_2 ($P_{\text{пл}}=2,2$ МПа, $P_{\text{пл}} = 8$ МПа).

Было смоделировано несколько вариантов закачки газообразного (сверхкритического) CO_2 с различными значениями ФЕС и углом наклона пласта-коллектора, закачка газообразного (сверхкритического) CO_2 с последующим отбором CH_4 (закачка газообразного (сверхкритического) CO_2 велась в купольную часть, а отбор CH_4 осуществлялся из периферии пласта-коллектора, расположенного под углом равным 15°), закачка газообразного (сверхкритического) CO_2 с последующим отбором CH_4 (закачка газообразного (сверхкритического) CO_2 велась в периферийную часть, а отбор CH_4 осуществлялся из купола пласта-коллектора, расположенного под углом равным 15°). Нейтральным периодом пренебрегли.

На рисунках 2 и 3 представлены варианты закачки газообразного и сверхкритического CO_2 при горизонтальном расположении пласта-коллектора.

В диссертационной работе детально рассмотрены все моделируемые варианты закачки газообразного и сверхкритического CO_2 .

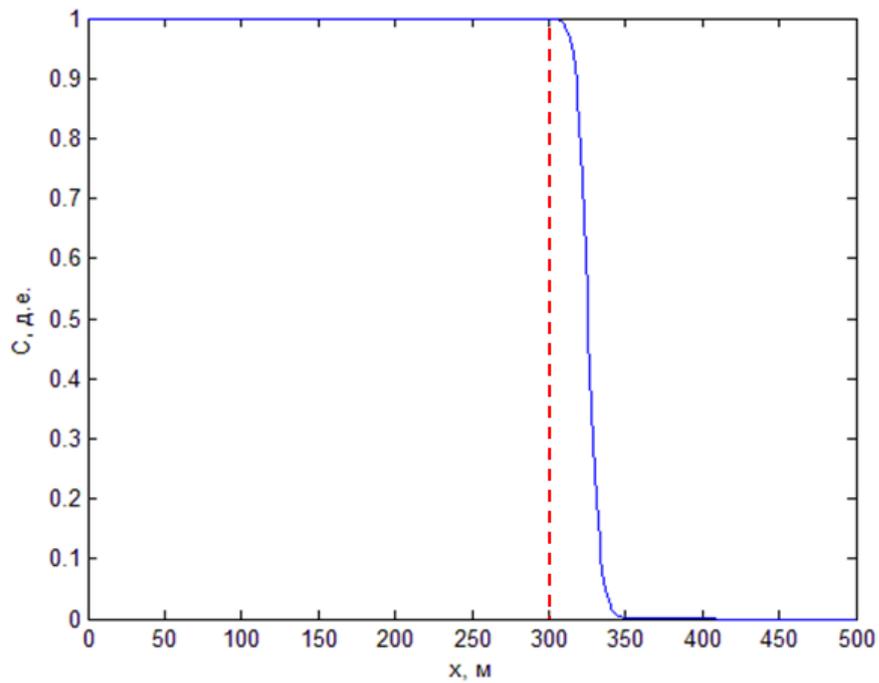


Рис. 2 – Распределение концентрации газообразного CO_2 в пластекolleкторе.

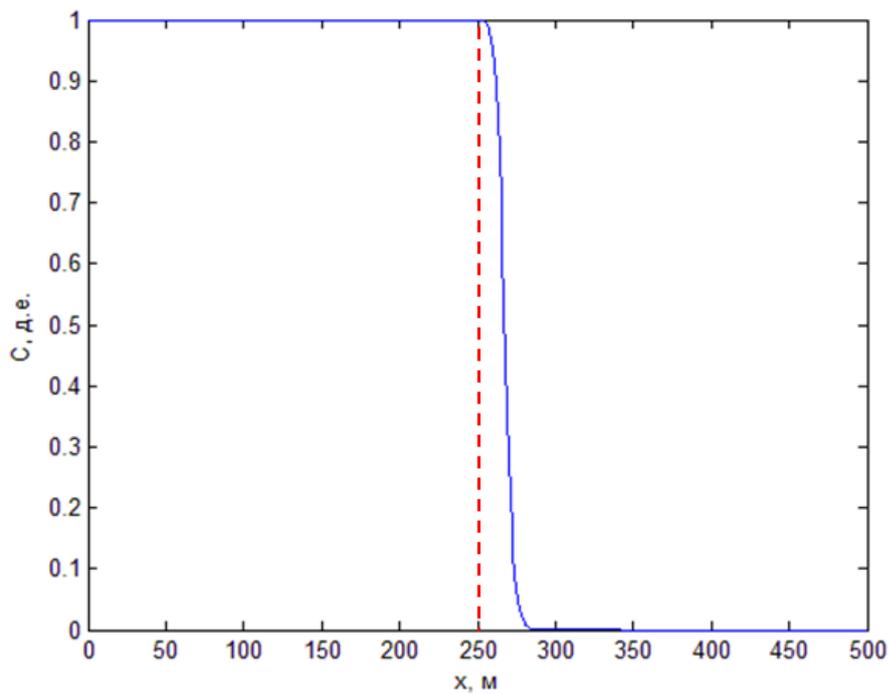


Рис. 3 – Распределение концентрации сверхкритического CO_2 в пластекolleкторе.

Данные расчеты были проверены с помощью гидродинамического симулятора, созданного компанией ROXAR, Tempest MORE 7.1 с теми же

входными данными, без учета диффузии и с тем же размером сетки, как и при моделировании на одномерной модели.

В результате гидродинамического моделирования были получены зоны смешения «газообразный $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ » – 55 метров, а «сверхкритический $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ » – 45 метров. Результаты расчетов на одномерной модели отличаются от расчета гидродинамического симулятора на 2,2 % (газообразный CO_2) и 2,6 % (сверхкритический CO_2) соответственно.

Данная погрешность является приемлемой. Тем самым одномерная математическая модель, требующая минимальное количество данных, подходит для оценочных расчетов зоны смешения при закачке CO_2 в пласт-коллектор.

Таким образом, на основе анализа решения системы уравнений 9 получены следующие выводы:

1. Для замещения буферного объема газа более эффективно сверхкритическое агрегатное состояние CO_2 , потому что при смешении сверхкритического CO_2 и CH_4 образуется меньшая зона смешения, по сравнению с газообразным агрегатным состоянием CO_2 ;
2. Необходимо подбирать пласт-коллектор с термобарическими параметрами, соответствующими сверхкритическому агрегатному состоянию CO_2 ($T_{\text{пл}} > 31^\circ\text{C}$, $P_{\text{пл}} > 7,38$ МПа);
3. При закачке CO_2 в купольную часть пласта:
 - наклон пласта на угол α ведет к увеличению зоны смешения;
 - наклон пласта на угол α и увеличение коэффициента проницаемости ведут к большему увеличению зоны смешения «сверхкритический $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ »;
 - наклон пласта на угол α и увеличение коэффициента пористости ведут к уменьшению зоны смешения «сверхкритический $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ »;

4. Для повышения эффекта гравитационного разделения закачку сверхкритического CO₂ необходимо вести на крылья пласта-коллектора.

В результате необходимо подбирать пласт-коллектор для закачки сверхкритического CO₂ с такими значениями фильтрационно-емкостных свойств, которые минимизируют зону смешения «сверхкритический CO₂ – CH₄», а также риски прорыва CO₂ к фонду эксплуатационных скважин (согласно проведенным расчетам), температурой пласта и рабочим давлением на объекте ПХГ, характерными сверхкритическому агрегатному состоянию CO₂.

Четвертая глава посвящена моделированию процесса замещения части буферного объема газа углеводородными газами на примере Кущевского ПХГ.

Федеральной службой по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) 11.01.2017 было принято решение о выдаче патента по заявке №2015146825 с приоритетом от 30.10.2015 на изобретение «Способ эксплуатации подземного хранилища природного газа», что подтверждает новизну и промышленную применимость разработанного технического решения.

Температура пласта – +47,5 °С, пластовое давление в зоне эксплуатационных скважин на конец закачки равно 13,56 МПа, а на конец отбора (при отборе всего оперативного резерва) – 6 МПа. В зоне расположения наблюдательных скважин №№ 312, 317, 319, 320 среднее значение пластового давления при отборе (закачке) равно 11,9-12,2 МПа (анализ замеров пластового давления, предоставляемых геологической службой Кущевского ПХГ). Таким образом, данная область является застойной и наиболее пригодной для закачки углеводородных газов с целью замещения метана в буферном объеме газа. Также термобарические параметры данной области соответствуют сверхкритическому агрегатному

состоянию CO_2 . Данная область также является погруженной, что должно усилить эффект гравитационного разделения CO_2 и метана.

Темп закачки CO_2 на один куст составляет 0,5 млн $\text{м}^3/\text{сут}$. Закачка CO_2 ведется до достижения молярной доли сверхкритического CO_2 в скважинной продукции (по всему эксплуатационному фонду) не более 2,5% при отборе, согласно СТО Газпром 089-2010. В результате чего в пласт-коллектор было закачено 2,31 млрд $\text{м}^3 \text{CO}_2$.

Для сравнения эффективности процесса замещения части буферного объема на сверхкритический CO_2 или N_2 необходимо сопоставить объемы, занимаемые данными углеводородными газами в пластовых условиях. По уравнению Клайперона-Менделеева получаем, что необходимо закачать 1,7 млрд $\text{м}^3 \text{N}_2$, чтобы уравнивать занимаемый им объем в пластовых условиях со сверхкритическим CO_2 .

Также стоит отметить, что N_2 будет вести себя в пластовых условиях как идеальный газ ($z=1,012$), в отличие от метана и сверхкритического CO_2 . Согласно модели идеального газа, его молекулы занимают незначительный объем (по сравнению с объемом газа) и не испытывают сил притяжения друг к другу. Молекулы же реальных газов обладают определенными размерами, массой и взаимодействуют друг с другом. Поэтому азот занимает больший объем в пластовых условиях, чем CO_2 , продвигая больший объем метана к фонду эксплуатационных скважин.

Производительность, число нагнетальных скважин и место закачки азота не изменились.

На примере Кущевского ПХГ была рассмотрена закачка в пласт углеводородных газов, таких как азот и углекислый газ. В результате были отмечены кусты, на скважинах которых произошел прорыв углеводородных газов. По кустам ГСП-3 (скв. №№ 152, 153, 154, 155, 156, 158, 159) и ГСП-4 (скв. №№ 191, 192, 195, 199, 210, 214) прорыв CO_2 произошел в результате перехода углекислого газа из сверхкритического состояния в газообразное из-за больших объемов отбора. По кусту ГСП-4

(скв. №№ 161, 163, 172, 194, 196, 209, 216) прорыв произошел в результате близкого расположения куста нагнетательных скважин (1170 м) при равном объеме закачанного CO₂ в каждый куст.

Из анализа данных результатов получены следующие выводы:

1. Сверхкритический CO₂ обладает большими значениями плотности и вязкости, превосходящими те же свойства метана в 6 и 4,2 раза, в отличие от азота, физические свойства которого сопоставимы с метаном, что оказывает существенное влияние на распространение фронта углеводородных газов и скорость прорыва. Поэтому содержание CO₂ в скважинной продукции меньше чем содержание азота (при одинаковых закачанных объемах CO₂ и N₂ в пластовых условиях);
2. Сверхкритический CO₂ лучше сжимается в отличие от азота, который ведет себя в пластовых условиях как идеальный газ. В результате можно закачать в пласт больший объем CO₂, чем азота, получив возможность не покупать квоты на выбросы CO₂ (климатическое Парижское соглашение), в отличие от азота, технология выделения которого в промышленных масштабах влечет эмиссию CO₂;
3. В связи с тем, что азот ведет себя в пластовых условиях как идеальный газ, меньшим объемом азота можно заместить больший объем метана в отличие от CO₂;
4. Интенсивность закачки не оказывает существенного влияния на прорыв CO₂, так как образовавшаяся воронка репрессии компенсируют физические свойства CO₂, которые существенно влияют на скорость фильтрации;
5. Необходимо подбирать такой объем оперативного резерва, чтобы в результате его отбора не образовывалось областей с давлением, характерным для газообразного состояния CO₂;

6. Повысить период эксплуатации объекта хранения газа без примеси CO_2 в результате отбора в скважинной продукции можно в результате перфорирования эксплуатационных скважин в прикровельной части пласта-коллектора, так как сверхкритический CO_2 в связи с гравитационным разделением преимущественно распространяется по подошве пласта, в отличие от азота;
7. Для большего вытеснения метана необходимо создавать несколько очагов нагнетания неуглеводородных газов, а также перфорировать нагнетательные скважины по всей продуктивной мощности пласта;
8. За весь расчетный период было отобрано 161,7 млн m^3 CO_2 и 408 млн m^3 азота, что составляет 7% и 24% от общего закачанного объема неуглеводородных газов соответственно.

Таким образом, сверхкритический CO_2 лучше подходит для замещения части буферного объема газа, чем азот, так как качество извлекаемой продукции намного выше у первого, исходя из того, что скорость прорыва меньше у сверхкритического CO_2 , чем у азота. Ряд трудностей при закачке N_2 возникает от того, что азот в пластовых условиях ведет себя как идеальный газ. Стоит отметить, что пренебрежение физическими свойствами азота привело к прорыву инертного газа на хранилище Сэн-Клер-Сюр-Эпт компании Gaz De France, что существенно осложнило его эксплуатацию. Более точно можно сравнить азот с CO_2 , создав СТО на его содержание в добываемой пластовой продукции. При наложении тех же требований как по CO_2 , качество извлекаемой продукции при использовании азота будет хуже, что связано с его большей подвижностью.

В пятой главе представлены результаты моделирования процесса захоронения CO_2 на примере Даньковской структуры.

Федеральной службой по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) был выдан патент на изобретение «Способ захоронения CO_2

(варианты)» №2583029 от 02.02.2015 (Патентообладатель – ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), что подтверждает новизну и промышленную применимость разработанного технического решения.

В работе показано, что для захоронения CO₂ больше подходит жидкое агрегатное состояние. Для этого необходимо подобрать пласт-коллектор с термобарическими параметрами, соответствующими жидкому агрегатному состоянию CO₂. Стоит отметить, что можно осуществлять закачку как газообразного, так и сверхкритического CO₂ в пласт-коллектор с термобарическими параметрами, соответствующими жидкому агрегатному состоянию CO₂, с последующим его переходом в жидкое агрегатное состояние, так и CO₂, находящегося изначально в жидком агрегатном состоянии.

Для выяснения более приемлемого агрегатного состояния CO₂ был смоделирован фазовый переход из газообразного и сверхкритического в жидкое агрегатное состояние CO₂ в процессе его закачки в пласт-коллектор с термобарическими параметрами Даньковской структуры по кровле Щигровского горизонта (температура – 19 °С, давление – 8 МПа), соответствующими жидкому агрегатному состоянию CO₂.

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. С технологической точки зрения лучшим агрегатным состоянием закачиваемого CO₂ является жидкое агрегатное состояние, позволяющее избежать прорывов языков CO₂ в результате закачки в пласт-коллектор, в отличие от газообразного и сверхкритического агрегатного состояния, что в свою очередь приведет к ограничениям темпа закачки CO₂ в пласт-коллектор;
2. С экономической точки зрения лучшим агрегатным состоянием закачиваемого CO₂ является газообразное состояние, так как нет необходимости в закупке дополнительного оборудования для

сжижения (сжатия) CO₂ (емкости, теплообменники, компрессоры и т. д.);

3. Более рентабельное агрегатное состояние закачиваемого CO₂ определяется исходя из конкретных геологических и термобарических условий для каждого объекта хранения.

Нагнетательная скважина Даньковской структуры на закачку метана и воды может работать с максимальным дебитом 1 млн м³/сут и 1000 м³/сут (поскольку данная структура аналогична структуре Касимовского ПХГ). Тогда для жидкого, сверхкритического и газообразного агрегатных состояний CO₂ максимальный дебит на закачку будет равен 11,428 кт/сут (исходя из соотношения вязкостей воды и жидкого CO₂), 315 и 600 тыс м³/сут (исходя из соотношения вязкостей метана и газообразного, сверхкритического CO₂) соответственно. Из выводов сделанных выше, будем закачивать CO₂ в газообразном агрегатном состоянии.

Нагнетание газообразного CO₂ осуществлялось в три куста. В купольной части куст состоит из 5 нагнетательных скважин (темп закачки газообразного CO₂ составляет 2 млн м³/сут), в седловине между двумя куполами куст состоит из 3 нагнетательных скважин (темп закачки газообразного CO₂ составляет 1,5 млн м³/сут). Закачка газообразного CO₂ ведется до проектной изогипсы -660 м. В результате чего в пласт-коллектор было закачено 17,775 млрд м³ газообразного CO₂, который перейдет в жидкое агрегатное состояние. Расчетный период составляет 10 лет. На максимальной производительности этот же объем газообразного CO₂ можно закачать за 4 года.

Тот же геометрический объем ловушки, вместивший 17,775 млрд м³ газообразного CO₂ (перешедшего в жидкое агрегатное состояние), займет 542,25 Мт жидкого CO₂, согласно формуле подсчета запасов нефти объемным методом. Тогда тем же числом скважин, что и для закачки газообразного CO₂, с максимальной производительностью 11,428 кт/сут

можно закачать в пласт-коллектор Даньковской структуры 542,25 Мт жидкого CO₂ за те же 10 лет.

Таким образом, проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что для захоронения CO₂ больше подходит жидкое агрегатное состояние, чем газообразное или сверхкритическое. В пластовых условиях плотность и вязкость жидкого CO₂ превышают те же параметры газообразного и сверхкритического агрегатных состояний этого же газа, но не воды. Следовательно, жидкий CO₂ будет находиться в породах, выше водонасыщенных, обладать меньшей подвижностью, а также обеспечивать больший объем хранения по сравнению с другими агрегатными состояниями.

Заключение

1. В результате проведенного анализа и обобщения имеющегося опыта по замещению части буферного объема природного газа CO₂ показано, что комплексное исследование агрегатных состояний CO₂ с позиции технологической целесообразности в настоящее время является актуальной и практически значимой задачей.
2. На основании проведенных численных исследований процессов, протекающих в пласте-коллекторе при закачке газообразного и сверхкритического CO₂, обосновано более рентабельное для частичного замещения части буферного объема природного газа агрегатное состояние CO₂.
3. На основании теоретических исследований, проведенных на одномерной математической модели, выявлено влияние фильтрационно-емкостных параметров, угла наклона пласта-коллектора, интенсивности закачки неуглеводородного газа, отбора метана на зону смешения «углекислый газ-метан», позволяющих рационально выбрать объект хранения газа для реализации технологии частичного замещения буферного объема природного газа.
4. Выявлены основные требования к пласту-коллектору, способному поддерживать CO₂ в необходимом агрегатном состоянии, позволяющие

подобрать глубину залегания пласта-коллектора, исходя из необходимого для захоронения углекислого газа или замещения части буферного объема газа CO_2 агрегатного состояния углекислого газа.

5. Проведено моделирование процесса замещения части буферного объема природного газа сверхкритическим CO_2 и N_2 на Кущевском ПХГ. По результатам гидродинамического моделирования был обоснован более приемлемый углеводородный газ для замещения части буферного объема природного газа, а также оценены риски прорыва того или иного углеводородного газа к эксплуатационным скважинам.
6. Проведено моделирование процесса захоронения CO_2 на Даньковской структуре. По результатам моделирования подтверждено оптимальное агрегатное состояние хранимого и закачиваемого CO_2 в пласт-коллектор. Разработан способ хранения CO_2 в жидком агрегатном состоянии в геологической структуре.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Хан С.А., Дорохин В.Г., Бондаренко Н.П. Использование особенностей агрегатных состояний двуокиси углерода для замещения части буферного объема подземных хранилищ газа // Газовая промышленность. – 2016. – №4. – С. 30-35.
2. Хан С.А., Дорохин В.Г. Анализ поведения сверхкритического CO_2 и N_2 в пластовых условиях при частичном замещении объемов буферного газа на примере Кущевского ПХГ // Газовая промышленность. – 2016. – №7-8. – С. 50-54.
3. Хан С.А., Дорохин В.Г. Совершенствование технологий оптимизации буферного объема природного газа в ПХГ за счет его частичной замены на углекислый газ в сверхкритическом агрегатном состоянии // Вестник Ассоциации Буровых Подрядчиков. – 2016. – №3. – С. 9-13.
4. Дорохин В.Г. Повышение эффективности работы ПХГ за счет замещения части буферного объема метанового газа на CO_2 / Тезисы

- докладов VI-ой открытой научно-технической конференции молодых специалистов и работников «Молодежь + Наука = Развитие нефтегазовой отрасли» – Астрахань: ООО «Газпром добыча Астрахань», 2015. – С. 234.
5. Дорохин В.Г. Использование особенностей агрегатных состояний CO₂ для замещения части буферного объема подземных хранилищ газа / Тезисы докладов XX-ой Международной научно-практической конференции «Реагенты и материалы для строительства, эксплуатации и ремонта нефтяных, газовых скважин: производство, свойства и опыт применения. Экологические аспекты нефтегазового комплекса» – Москва: ООО «Аркаим», 2016. – С. 157-158.
 6. Дорохин В.Г. Анализ эффективности замещения части буферного объема метанового газа сверхкритическим CO₂ и N₂ на примере Куцевского ПХГ / Тезисы докладов VIII-ой научно-технической конференции молодых специалистов ООО «Газпром ПХГ» – Москва: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2016. – С. 12-13.
 7. Дорохин В.Г. Использование особенностей агрегатных состояний CO₂ для замещения части буферного объема ПХГ и захоронения CO₂ в пористой среде / Тезисы докладов внутренней молодежной научно-практической конференции ООО «Газпром ВНИИГАЗ» «Инновации сегодня и завтра: миссия молодых ученых» – Москва: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2016. – С. 30.
 8. Пат. 2583029 РФ, С1. Способ захоронения CO₂ (варианты) / С.А. Хан, В.Г. Дорохин, В.Ю. Хвостова (РФ). – №2015103160; Заявлено 02.02.2015; Оpubл. 27.04.2016.

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»