

Особенности формирования области газонасыщенности при создании ПХГ в истощенной газовой залежи в коллекторе трещиновато-порового типа с активным аквифером

А.Р. Гайсин, А.И. Шаяхметов, А.И. Пономарёв*, В.Л. Малышев, Е.Ф. Моисеева
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Задача увеличения емкости подземных хранилищ газа актуальна как для вновь создаваемых, так и для уже существующих. Создание таких хранилищ представляет собой процедуру последовательного наращивания объемов газа в пласте, требует длительных периодов времени и даже в однородных пластах составляет восемь-десять циклов закачки-отбора газа. В течение этого периода происходит стабилизация технологических показателей эксплуатации, формирование переходной зоны на газоводяном контакте, стабилизация объемов активного и буферного газа. В работе исследовано влияние различных геолого-технологических факторов на формирование переходной зоны в пределах газоводяного контакта при создании и эксплуатации подземного хранилища газа в истощенной газовой залежи в коллекторах трещиновато-порового типа с активным аквифером. В качестве инструментария исследования использовалось трехмерное гидродинамическое моделирование в программном продукте tNavigator. В результате установлено влияние параметров на характер распространения газонасыщенности в водоносной области пласта, таких как угол падения пласта, объем активного газа в эксплуатационной зоне пласта, проницаемость матрицы (межзерновая) и трещинная проницаемость при заданном размере блоков матрицы.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, трещиновато-поровый коллектор, подземное хранение газа, заземление газа, упруговодонапорный режим

Для цитирования: Гайсин А.Р., Шаяхметов А.И., Пономарёв А.И., Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф. (2024). Особенности формирования области газонасыщенности при создании ПХГ в истощенной газовой залежи в коллекторе трещиновато-порового типа с активным аквифером. *Георесурсы*, 26(1), с. 136–144. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.1.12>

Введение

Характер продвижения газоводяного контакта (ГВК) по площади и разрезу зависит от многих факторов: это неоднородность пласта коллектора, геометрия пласта, технологический режим и др. В работе (Бузинов и др., 1981) проведено исследование по определению формы ГВК при создании подземного хранилища газа (ПХГ) в однородных водоносных пластах.

Неоднородность пластов коллекторов обуславливает неравномерное перемещение газоводяного контакта при эксплуатации ПХГ. Циклическая смена направлений фильтраций воды и газа в периоды отбора и закачки приводит к распространению газа как более подвижного флюида по сравнению с пластовой водой в водоносную область по высокопроницаемым каналам с последующим частичным его заземлением водой и формированием переходной зоны. В ряде существующих ПХГ, несмотря на длительный период эксплуатации, наблюдается постепенное снижение пластового давления. Снижение пластового давления от цикла к циклу при одинаковых объемах газа в ПХГ свидетельствует об увеличении газонасыщенного порового объема или о геологических

потерях газа. Однако точно определить причину снижения пластового давления без специальных исследований и тщательного анализа данных не представляется возможным (Енгибарян, Поваров, 2018; Пономарев и др., 2020, 2022; Ponomarev, Shayakhmetov, 2018).

В работах (Wang et al., 2020) экспериментально показано, что количество закачиваемого газа всегда превышает количество добываемого газа в каждом цикле, при этом доля не отобранного за период газа уменьшается с каждым последующим циклом закачки/отбора и зависит от пористости и проницаемости горной породы. Результаты численного моделирования циклической эксплуатации ПХГ указывают на разные расстояния проникновения газа, воды и газоводяной смеси в пласте.

Лабораторные исследования на вертикальной насыпной модели пласта, проведенные С.Н. Закировым, Р.Р. Файзрахмановым (Закиров и др., 2002), подтверждают выводы А.Л. Хейна (Хейн, 1975), что объем переходной зоны в периоды создания и расширения ПХГ имеет тенденцию к росту, а период стабилизации составляет 8–10 циклов закачки-отбора газа. В работе (Михайловский, 2010) в результате расчетов по математической модели одномерной радиальной неустановившейся двухфазной фильтрации в однослойном осесимметричном водоносном пласте установлены закономерности процесса многократно чередующегося вытеснения воды и газа в гидрофильных пористых средах, а также обнаружен

* Ответственный автор: Александр Иосифович Пономарёв
e-mail: pnmrv@mail.ru

© 2024 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

и изучен эффект гистерезиса относительной фазовой газопроницаемости. Эффект заключается в уменьшении газонасыщенности в области свободного газа и ее увеличении в приконтактной переходной области, что приводит к своеобразному «размазыванию» в пласте газа, т.е. к значительно более широкому его распространению при одновременном снижении уровня газонасыщенности.

Вопросы обоснования объема буферного газа подземных хранилищ газа, создаваемых в истощенных газовых залежах в коллекторах порового типа с газовым режимом разработки рассмотрены в работе (Хан и др., 2008). В работе (Ермолаев, Воронова, 2013) приведена методика оптимизации объема буферного газа ПХГ в коллекторах трещинно-порового типа с активным аквифером при эксплуатации в циклическом режиме, но без учета формирования переходной зоны. Показано, что достоверные результаты газогидродинамического моделирования таких ПХГ возможно получить только с использованием модели двойной пористости/двойной проницаемости.

Одним из способов мониторинга параметров ПХГ является метод, основанный на анализе гистерезисных диаграмм (Дудникова, 2017; Рубан, 2016; Лурье и др., 2004). Смещение петли гистерезисной диаграммы может говорить об изменении газонасыщенного порового объема пласта либо о потерях газа в водоносную область.

В работе (Джомардов и др., 2016) разработана методика расчета потерь газа в процессе создания и эксплуатации подземного хранилища, послужившая основой создания стандарта AZS 761-2014 по оценке пластовых потерь газа при циклической эксплуатации ПХГ.

В работе (Михайловский, 2010) дана классификация объемов буферного газа по степени участия в фильтрационных газовых потоках:

- 1) активно дренируемая часть буферного объема газа;
- 2) пассивно дренируемая часть буферного объема газа;
- 3) недренируемая часть буферного объема газа.

Под недренируемым объемом газа в пласте понимается часть объема газа в пласте, которая не принимает участие во внутрипластовых фильтрационных газовых потоках и не поддерживает пластовое давление в области расположения эксплуатационных скважин при отборе газа. К недренируемой части буферного газа также относится газ, защемленный в переходной зоне на газоводяном контакте за счет капиллярных, адсорбционных и других сил. В период создания ПХГ происходит интенсивный переход газа из дренируемой части в недренируемую (Ghanizadeh et al., 2021; Colonna et al., 1972; Kjosavik et al., 2002; Fatemi et al., 2012).

В настоящей работе на основе компьютерной модели трещинно-порового пласта исследовано влияние различных факторов на формирование переходной зоны и формы контакта газ – вода при создании ПХГ в водоносных пластах с таким типом коллектора. Изучено влияние углов падения пласта, соотношения объемов активного и буферного газа, а также соотношений трещинной и межзерновой проницаемостей на объемы газа, распространяющегося в водоносную область.

Гидродинамическая модель пласта

Для решения поставленной задачи в программном комплексе Рок Флоу Динамикс t-Navigator (<https://rfdyn.ru>)

построена гидродинамическая модель участка полособразного пласта с двойной проницаемостью. В табл. 1 приведены параметры гидродинамической модели залежи с аквифером, принятой в качестве базовой. При этом объем аквифера в 7,7 раза превышает объем газовой залежи.

На первом этапе моделируемая залежь пластового типа разрабатывается в течение 15 лет в режиме истощения пластовой энергии (процесс разработки объекта). Пластовое давление за этот период снижается с 10,5 до 2,57 МПа, а коэффициент извлечения газа к концу 15-го года составляет 80%. Последующие четыре года залежь не эксплуатируется. Далее для организации подземного хранилища в залежь закачивается буферный газ в объеме 10 млн м³, что позволяет смоделировать процесс пробной закачки газа в пласт с целью оценки возможности обеспечения заданных темпов его отбора. С 20-го года ПХГ вводится в эксплуатацию в циклическом режиме (6 месяцев отбора/6 месяцев закачки). Годовые объемы отбора и закачки остаются постоянными в течение 20 лет (рис. 1).

Влияние угла наклона пласта на распространение газа в водоносную область

Для исследования влияния угла падения пласта на распространение газа за начальный уровень ГВК были построены гидродинамические модели с отличными от базовой модели углами падения: 1°, 3°, 7°, 10° относительно горизонтальной плоскости. Изменение объемов газа, распространившегося в водоносную область за первые 20 лет циклической эксплуатации, при различных углах падения пласта и объемах буферного газа в хранилище показано на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что с уменьшением угла наклона пласта объем газа, распространившийся в водоносную область за начальный уровень ГВК (НГВК) газовой залежи, увеличивается. За НГВК принимается положение контакта газ – вода до ввода залежи в разработку. Отмеченная тенденция обусловлена увеличением площади газоводяного контакта при уменьшении угла падения пласта. Площади ГВК при углах падения 1°, 3°, 5°, 7° и 10° к площади ГВК при угле падения 10° соотносятся как 10,3:1; 3,4:1; 2:1; 1,5:1 и 1:1 соответственно. Степень влияния угла наклона

Наименование параметра	Значение
Начальные запасы газа в залежи $Q_{н.зап}$, млн м ³	100
Начальные запасы воды водоносной области, млн м ³	7,1
Пористость, д.ед.:	
трещин	0,01
матрицы	0,25
Проницаемость, мД:	
трещин $k_{тр}$	1000
матрицы k_m	1
Размеры модели, м	100×10000×30
Количество ячеек	10×1000×15
Угол наклона пласта, градусов	5
Объем активного газа в период циклической эксплуатации ПХГ $Q_{ак}$, млн м ³	30
Объем буферного газа в период циклической эксплуатации ПХГ $Q_{буф}$, млн м ³	30

Табл. 1. Параметры базовой гидродинамической модели пласта

пласта уменьшается при углах от 5° и больше. Однако зависимость удельного объема газа, распространившегося в водоносную область (объем газа на единицу площади НГВК), имеет обратный характер. При увеличении угла наклона пласта удельный объем распространившегося за НГВК газа возрастает (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что зависимость удельного объема газа, распространившегося в водоносную область, от угла падения пласта имеет линейный характер, при этом с ростом объема буферного газа в ПХГ вклад угла падения пласта увеличивается. Удельный объем газа, распространившегося в водоносную область, при угле наклона пласта 10° в среднем (при различных объемах буферного газа) в 4,5 раза превышает удельный объем газа, распространившегося в водоносную область, при угле наклона пласта 1° , а его величина может варьироваться от 50 до $235 \text{ м}^3/\text{м}^2$ в зависимости от объема буферного газа в хранилище.

На рис. 4 представлены графики изменения удельных объемов газа ниже уровня НГВК, где видно, что с уменьшением угла падения пласта и объема буферного газа в хранилище наблюдается рост длительности периода стабилизации переходной зоны (может достигать более 20 циклов отбора/закачки газа). Кроме того, увеличение объема буферного газа в ПХГ приводит к росту удельного объема газа, распространившегося в водоносную область.

Влияние объема активного газа в хранилище на распространение газа в водоносную область

На следующем этапе исследования оценено влияние объемов активного газа на объем газа, распространившегося в водоносную область за пределы положения НГВК. Были построены гидродинамические модели с разными объемами активного газа: 10%, 20%, 30%, 40% от начальных запасов газа. Зависимость изменения удельных объемов газа, распространившихся в водоносную область за пределы НГВК к 20-му году циклической эксплуатации ПХГ, от объема активного газа при различных объемах буферного газа в хранилище также линейна и представлена на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что с увеличением объема активного газа удельный объем газа, распространившегося в водоносную область, растет линейно и может достигать $150 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Прирост составляет в среднем $20 \text{ м}^3/\text{м}^2$ при увеличении $Q_{\text{ак}}$ на 10% от начальных запасов газа.

Влияние матричной и трещинной проницаемости на распространение газа в водоносную область

Оценка влияния трещинной и межзерновой проницаемости коллектора на распространение газа в водоносную область при эксплуатации подземного хранилища газа производилась на моделях с различными соотношениями

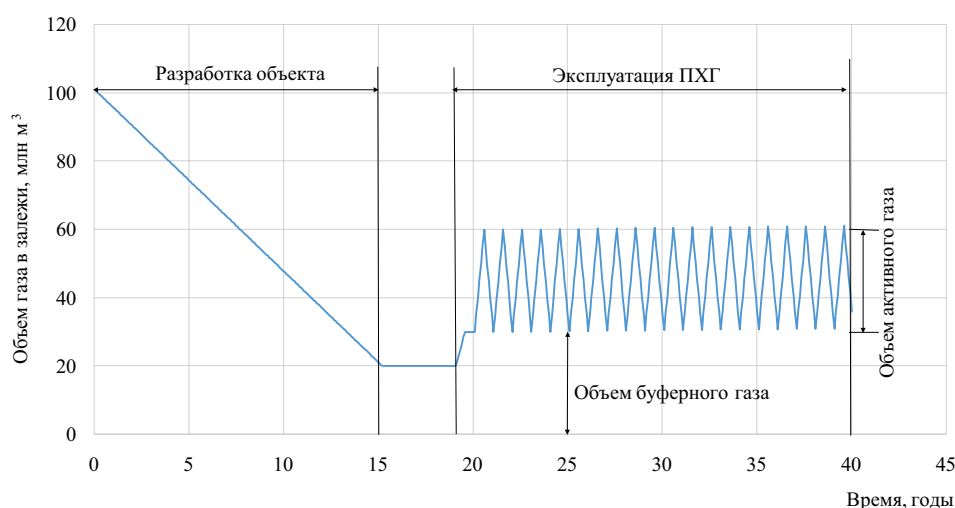


Рис. 1. Динамика запасов газа в газовой залежи и общего объема газа в ПХГ базовой модели

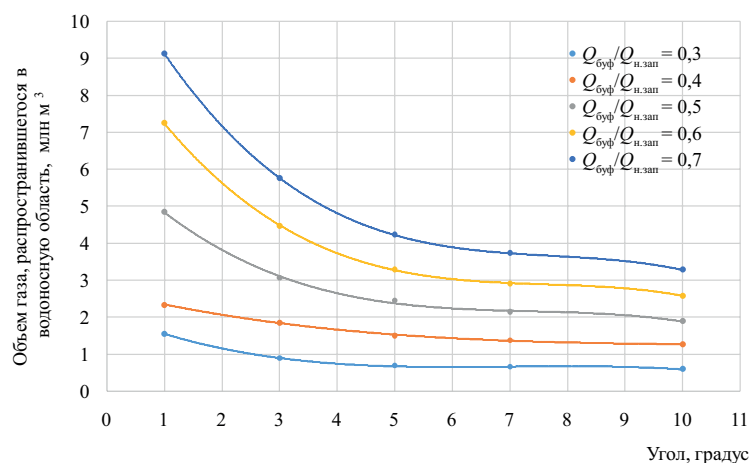


Рис. 2. Влияние угла наклона пласта на удельный объем газа, распространившегося за пределы НГВК к 20-му году циклической эксплуатации ПХГ при различных объемах буферного газа

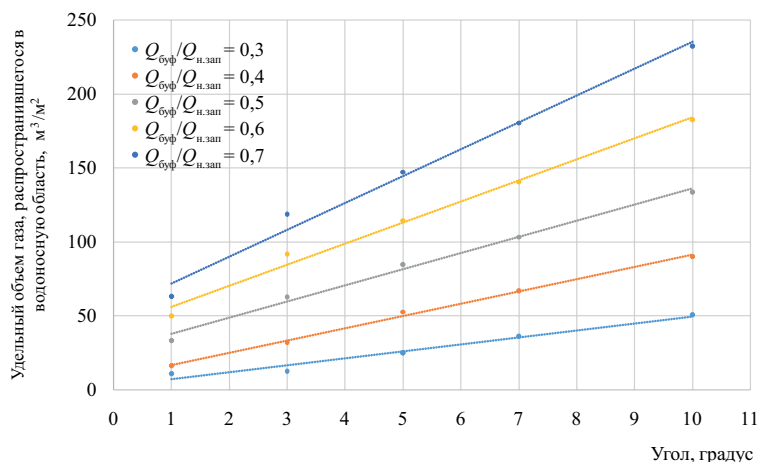


Рис. 3. Влияние угла наклона на объем распространившегося за пределы НГВК газа к 20-му году циклической эксплуатации ПХГ при различных объемах буферного газа

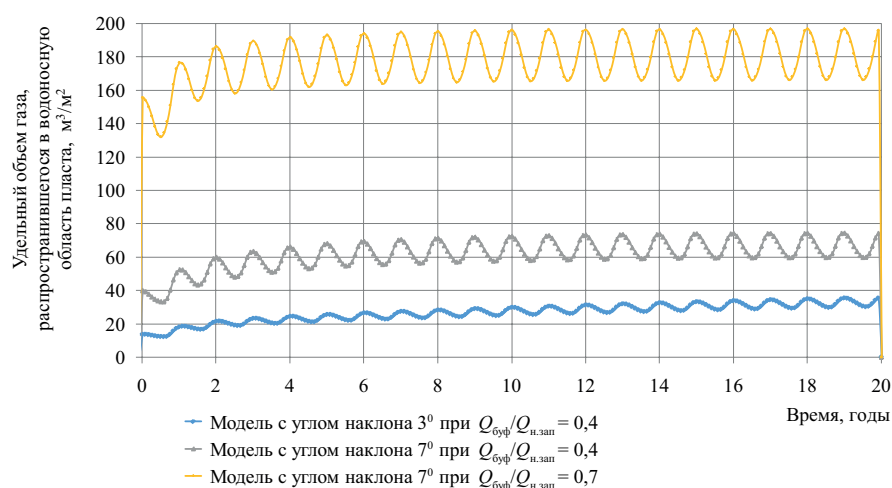


Рис. 4. Динамика удельного объема газа, распространившегося в водоносную область, при углах наклона пласта 3° и 7° и объеме буферного газа в хранилище при его эксплуатации $0,4Q_{н.зап}$ и $0,7Q_{н.зап}$

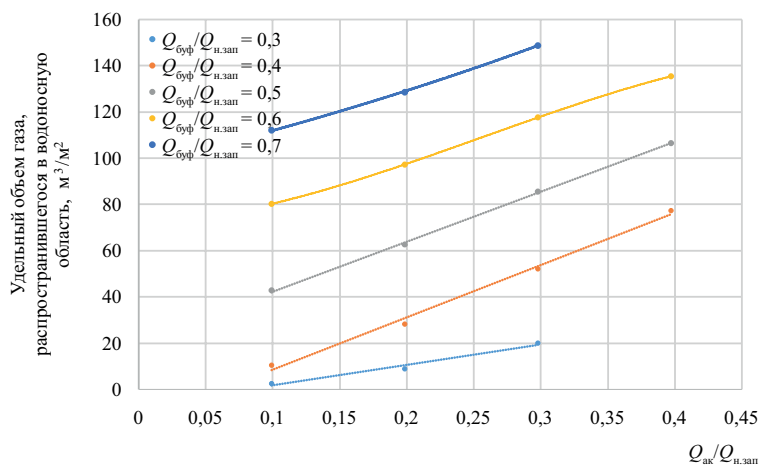


Рис. 5. Зависимость удельного объема газа, распространившегося в водоносную область к 20-му году циклической эксплуатации ПХГ, от соотношения объема активного газа к начальным запасам газа в хранилище при разных значениях $Q_{буф}/Q_{н.зап}$

проницаемости трещин $k_{тр}$ и проницаемости матрицы k_m (мД):

- 1) 10:1; 100:1; 1000:1; 10000:1 (рис. 6);
- 2) 10:10; 100:10; 1000:10; 10000:10; 100000:10 (рис. 7).

Результаты моделирования представлены в виде зависимостей удельного объема газа, распространившегося

в водоносную область к 20-му году циклической эксплуатации ПХГ, от $\lg(k_{тр}/k_m)$ при различных объемах буферного газа.

На рис. 8 представлены кубы газонасыщенности в системе трещин для различных вариантов соотношения трещинной и межзерновой проницаемостей к концу

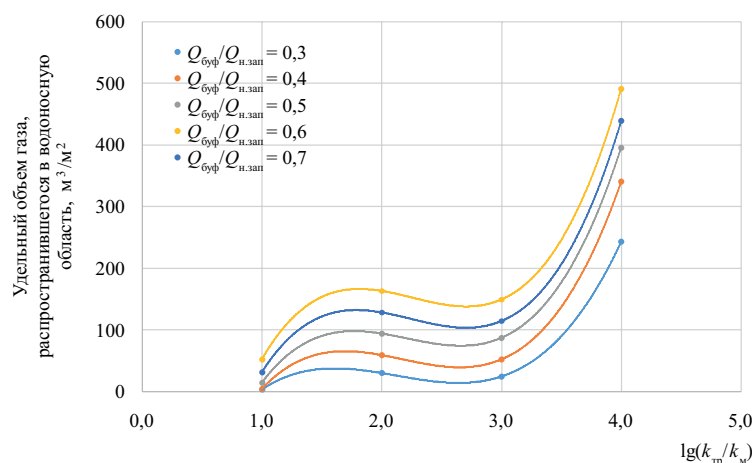


Рис. 6. Зависимость удельного объема газа, распространившегося в водоносную область к 20-му году циклической эксплуатации ПХГ на конец отбора, от $\lg(k_{тр}/k_m)$ при разных значениях $Q_{буф}/Q_{н.з.ап}$ для пласта с проницаемостью матрицы 1 мД

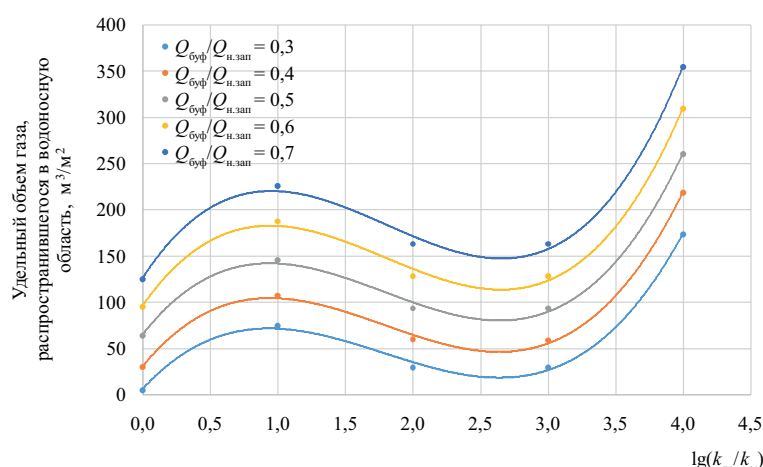


Рис. 7. Зависимость удельного объема газа, распространившегося в водоносную область к 20-му году циклической эксплуатации ПХГ на конец отбора, от $\lg(k_{тр}/k_m)$ при разных значениях $Q_{буф}/Q_{н.з.ап}$ для пласта с проницаемостью матрицы 10 мД

периода закачки газа после стабилизации показателей эксплуатации подземного хранилища при циклическом режиме работы.

Из рис. 6 и 7 видно, что зависимости удельного объема газа, распространившегося в водоносную область, от соотношения проницаемостей системы трещин и матрицы являются немонотонными. При этом максимумы удельного объема газа при трещинной проницаемости 100 мД связаны с активным продвижением газа по прикровельной зоне пласта. Такое неравномерное распространение газа в водонасыщенную область пласта в период закачки объясняется гравитационной сегрегацией газа и воды при высоких фильтрационных сопротивлениях и вязкостной неустойчивостью фронта (рис. 8а). Выравнивание фронта газ-вода с увеличением трещинной проницаемости до 1000 мД (рис. 8б) обусловлено снижением фильтрационных сопротивлений при тех же темпах закачки и ростом вклада гравитационной сегрегации. При этом наблюдается соответствующее снижение удельного объема газа, распространившегося в водонасыщенную зону.

Повышение удельного объема газа, распространившегося в водоносную область, при $\lg(k_{тр}/k_m) > 3$ связано с активным распространением газа в водоносную область через систему трещин практически по всей толщине

пласта (рис. 8в) с соответствующим снижением газонасыщенности матрицы в сравнении с вариантом (рис. 8б).

На рис. 9 представлено распределение газонасыщенности в системе трещин на различные временные этапы для модели с соотношением проницаемостей трещин и матрицы 1000:10.

На рис. 10 показаны распределения газонасыщенности в пористой среде матрицы по длине моделей, представленных на рис. 8, на различные моменты времени: начало разработки газовой залежи и после 20 лет эксплуатации ПХГ.

Визуализация распределения газонасыщенности на рис. 8б соответствует зависимости 4 на рис. 9.

Влияние начальных запасов газа в газовой залежи на распространение газа в водоносную область пласта

Рассмотрено влияние начальных запасов газа в газовой залежи пластового типа на объем распространившегося в водоносную область газа при одинаковых соотношениях объемов активного и буферного газа к начальным запасам и при прочих равных условиях.

За базовый вариант принимается модель с объемом активного газа 10% и объемом буферного газа 30% от начальных запасов газа газовой залежи. Для сравнения построена модель с уменьшенным в 4 раза газонасыщенным поровым объемом газовой залежи (с уменьшенными

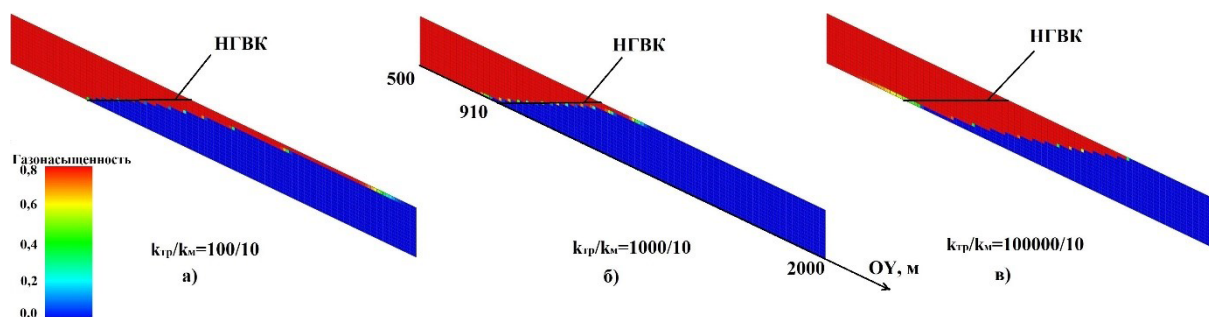


Рис. 8. Куб газонасыщенности в системе трещин для вариантов при соотношениях проницаемостей системы трещин и матрицы: 100:10 (а); 1000:10 (б); 100000:10 (в) к концу периода закачки газа в ПХГ

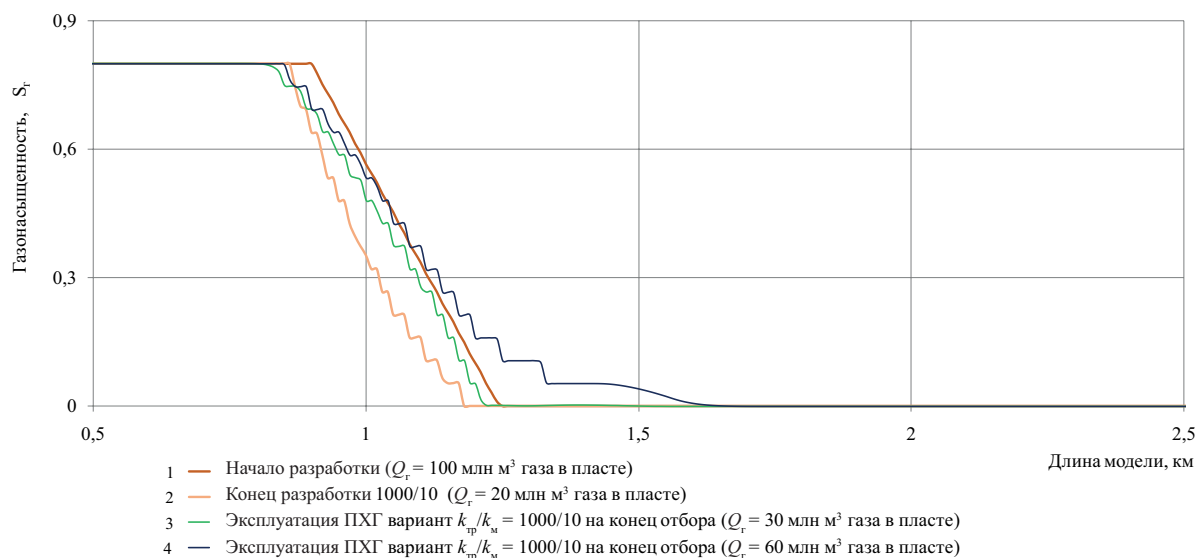


Рис. 9. Распределение газонасыщенности в системе трещин по длине модели на моменты времени: начало разработки, конец разработки, после 20 лет эксплуатации ПХГ на конец периода отбора, после 20 лет эксплуатации ПХГ на конец периода закачки при соотношении проницаемостей трещин и матрицы 1000:10

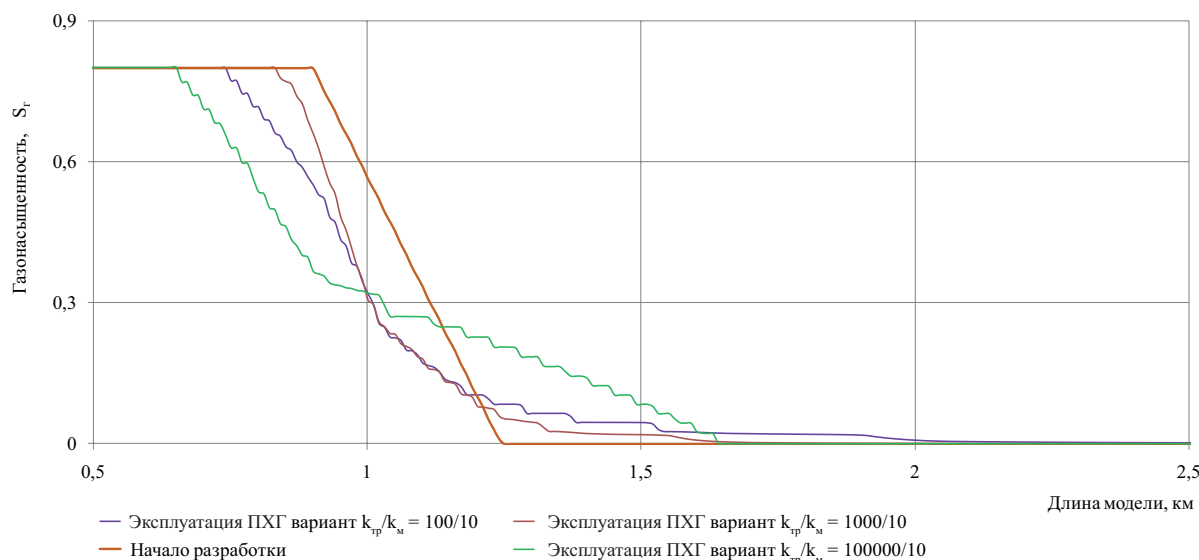


Рис. 10. Распределение газонасыщенности в матрице по длине модели при соотношениях проницаемостей трещин и матрицы: 100:10; 1000:10; 100000:10 на моменты времени: начало разработки и после 20 лет эксплуатации ПХГ

в 4 раза начальными запасами газа в газовой залежи), за счет подъема НГВК.

В результате расчетов по гидродинамической модели двух рассматриваемых вариантов на базе пласта-коллектора с одними и теми же параметрами установлено,

что влияние различных начальных запасов газа (начального газонасыщенного порового объема залежи) при одинаковой динамике пластового давления при циклической эксплуатации ПХГ на размеры переходной зоны на ГВК и глубину распространения газа в водоносную область

незначительно. Отличие в объемах газа, распространившихся в водоносную область, составляет меньше 2%, что сопоставимо с погрешностью моделирования.

Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что при эксплуатации ПХГ в пласте с трещинно-поровым коллектором:

1) с уменьшением углов падения пласта и объема буферного газа в хранилище наблюдается увеличение длительности периода стабилизации переходной зоны ГВК (может достигать более 20 циклов отбора/закачки газа);

2) при увеличении угла падения пласта и объема буферного газа удельный объем распространившегося за пределы НГВК газа линейно растет. Максимальный удельный объем распространившегося в водоносную область газа может достигать $235 \text{ м}^3/\text{м}^2$ при угле наклона 10° и буферном объеме 70% от начальных запасов;

3) увеличение объема активного газа в хранилище приводит к линейному росту объема и глубины распространения за НГВК газа; при эксплуатации ПХГ с объемами активного и буферного газа 30% и 70% соответственно от начальных запасов удельные объемы распространившегося в водоносную область газа могут достигать $150 \text{ м}^3/\text{м}^2$;

4) при низких значениях трещинной проницаемости газ активно распространяется в водоносную область по прикровельной зоне пласта-коллектора. С ростом трещинной проницаемости фронт газ – вода выравнивается за счет гравитационного разделения, и при дальнейшем росте трещинной проницаемости наблюдается увеличение амплитуды размера области циклического движения ГВК при эксплуатации ПХГ;

5) влияние начальных запасов газа и газонасыщенного порового объема залежи при одинаковых соотношениях объемов активного и буферного газа к начальным запасам, одинаковой динамике пластового давления при циклической эксплуатации ПХГ и при прочих равных условиях на объем распространившегося за пределы НГВК газа минимально.

Литература

- Бузинов С.Н., Гусев Э.Л., Сухарев М.Г., Шеберстов Е.В. (1981). Методические рекомендации по расчету формы контакта газ-вода при создании подземных хранилищ газа в водоносных пластах. М.: ВНИИГАЗ, 78 с.
- Джомардов А.Я., Годжев А.Г., Рзаева С.Д., Сулейманова П.Ю. (2016). Оценка потерь газа при его хранении в выработанных газоконденсатных месторождениях Азербайджана. *SOCAR Proceedings*, (2), с. 50–55.
- Дудникова Ю.К. (2017). Активные методы регулирования создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в водоносных пластах: Дис. ... канд. техн. наук. М., 142 с.
- Енгибарян М.А., Поваров Д.А. (2018). Повышение эффективности эксплуатации ПХГ, созданных в пористых пластах с активной водонапорной системой, как части единой системы газоснабжения. *Газовая промышленность*, (6), с. 72–77.
- Ермолаев А.И., Воронова В.В. (2013). Оптимизация буферного объема газа при его подземном хранении. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*, (4), с. 38–42.
- Закиров С.Н., Файзрахманов Р.Р., Сомов Ю.М. (2002). Закономерности периодического вытеснения газа водой и воды газом. *Газовая промышленность*, (11), с. 35–37.
- Лурье М.В., Дидковская А.С., Вегера А.И. (2004). Анализ эксплуатации подземных газохранилищ на основе гистерезисных диаграмм. *Известия вузов. Нефть и газ*, (4), с. 63–72.

Михайловский А.А. (2010). Научные основы регулирования и контроля количества газа в пористых пластах подземных хранилищ: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 411 с.

Пономарев А.И., Малышев В.Л., Шаяхметов А.И. (2020). Оценка недраенируемого объема буферного газа при создании ПХГ в истощенной газоконденсатной залежи. *Актуальные вопросы исследования нефтегазовых пластовых систем: III Междунар. науч.-практ. конф.* М.: Газпром ВНИИГАЗ, с. 120.

Пономарев А.И., Шаяхметов А.И., Малышев В.Л., Моисеева Е.Ф., Костиков С.Л., Гринь О.В. (2022). Актуальные вопросы создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в истощенных газоконденсатных месторождениях. *Актуальные вопросы исследования нефтегазовых пластовых систем: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф.* М.: Газпром ВНИИГАЗ, с. 27.

Рубан Г.Н. (2016). Геолого-технологический контроль ПХГ. М.: ИЦ РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 207 с.

Хан С.А., Ермолаев А.И., Самуйлова Л.В., Золотухин М.В. (2008). Обоснование объемов буферного газа для подземных хранилищ. *Наука и техника в газовой промышленности*, 2(34), с. 36–46.

Хейн А.Л. (1975). Изучение на петрофизической модели процесса циклической эксплуатации ПХГ в водоносном пласте. *Газовая промышленность*, (11), с. 32–36.

Colonna J., Brissaud F., Millet J.L. (1972). Evolution of Capillarity and Relative Permeability Hysteresis. *SPE Journal*, 12(1), pp. 28–38. <https://doi.org/10.2118/2941-PA>

Fatemi S.M., Sohrabi M. (2012). Experimental and Theoretical Investigation of Water/Gas Relative Permeability Hysteresis: Applicable to Water Alternating Gas (WAG) injection and Gas Storage Processes. *Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition*, SPE-161827-MS. <https://doi.org/10.2118/161827-MS>

Ghanizadeh A., Song C., Clarkson Ch.R., Younis A. (2021). Relative permeability of tight hydrocarbon systems: An experimental study. *Fuel*, 294, 119487. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119487>

Kjosavik A., Ringen J.K., Skjaeveland S.M. (2002). Relative Permeability Correlation for Mixed-Wet Reservoirs, *SPE Journal*, 7(1), pp. 49–58. <https://doi.org/10.2118/77328-PA>

Ponomarev A., Shayakhmetov A. (2018). Prediction flooding of well stock on the large gas fields with stratified heterogeneity. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, SPE-191658-18RPTC-MS. <https://doi.org/10.2118/191658-18RPTC-MS>

Wang J., Fu J., Xie J., Wang J. (2020). Quantitative characterisation of gas loss and numerical simulations of underground gas storage based on gas displacement experiments performed with systems of small-core devices connected in series. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 81, 103495. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103495>

Сведения об авторах

Айдар Рамилевич Гайсин – преподаватель кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений», Уфимский государственный нефтяной технический университет

Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
e-mail: ramilka112@mail.ru

Айрат Ильфатович Шаяхметов – канд. тех. наук, доцент кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений», Уфимский государственный нефтяной технический университет

Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
e-mail: airat_shayahmeto@mail.ru

Александр Иосифович Пономарев – доктор тех. наук, профессор, зав. кафедрой «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений», Уфимский государственный нефтяной технический университет

Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
e-mail: pnmrv@mail.ru

Виктор Леонидович Малышев – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений», Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
e-mail: victor.l.malyshev@gmail.com

Елена Флоридовна Моисеева – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений», Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
e-mail: elena.f.moiseeva@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02.05.2023;

Принята к публикации 28.02.2024; Опубликована 30.03.2024

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Features of the Formation of a Gas-Saturated Area During the Creation of an Underground Gas Storage in a Depleted Gas Reservoir in a Fractured-Pore Type Reservoir with an Active Aquifer

A.R. Gaysin*, A.I. Shayahmetov, A.I. Ponomarev, V.L. Malyshev, E.F. Moiseeva

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

*Corresponding author: Aydar R. Gaysin, e-mail: ramilka112@mail.ru

Abstract. Underground gas storages are an important component of reliable year-round operation of the country's gas transportation system. The task of increasing the storage capacity is relevant both for newly created underground gas storages and for existing ones. The expansion of underground gas storage is a procedure for the sequential increase of gas volumes in the reservoir. It requires considerable time and in homogeneous formations can reach from eight to ten cycles of gas injection and production. During this period, the technological indicators of the development are stabilized, a stable transition zone is formed along the gas-water contact, and the active and buffer volumes of gas are stabilized. The main aim is in investigation of the influence of various factors on the formation of the transition zone within the gas-water contact during the creation and operation of underground gas storage in the elastic-water-pressure regime in fracture-pored reservoirs. Paper was based by Hydrodynamic computer 3D modelling. The nature of the influence of the following parameters on the volume of gas pushed into the aquifer region has been established: the angle of incidence of the formation, the values of minimum and maximum pressures in the gas-saturated part during the operation of the underground gas storage, the permeability of the matrix (intergranular) and fractures permeability.

Keywords: hydrodynamic modeling, fractured-pore collector, underground gas storage, trapped gas

Recommended citation: Gaysin A.R., Shayahmetov A.I., Ponomarev A.I., Malyshev V.L., Moiseeva E.F. (2024). Features of the Formation of a Gas-Saturated Area During the Creation of an Underground Gas Storage in a Depleted Gas Reservoir in a Fractured-Pore Type Reservoir with an Active Aquifer. *Georesursy = Georesources*, 26(1), pp. 136–144. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.1.12>

References

- Buzinov S.N., Gusev E.L., Sukharev M.G., Sheberstov E.V. M. (1981). Methodological recommendations for calculating the form of gas-water contact when creating underground gas storage facilities in aquifers. Moscow: VNIIGAZ, 78 p. (In Russ.)
- Colonna J., Brissaud F., Millet J.L. (1972). Evolution of Capillarity and Relative Permeability Hysteresis. *SPE Journal*, 12(1), pp. 28–38. <https://doi.org/10.2118/2941-PA>
- Dudnikova Yu.K. (2017). Active methods for regulating the creation and operation of underground gas storage facilities in aquifers. Cand. tech. Sci. diss. Moscow, 142 p. (In Russ.)
- Dzhomardov A. Ya., Godzhev A.G., Rzaeva S.D., Suleymanova P.Yu. (2016). Assessment of gas losses during its storage in depleted gas condensate fields of Azerbaijan. *SOCAR Proceedings*, 2, pp. 50–55. (In Russ.)
- Engibaryan M.A., Povarov D.A. (2018). Increasing the operational efficiency of underground gas storage facilities created in porous formations with an active water pressure system, as part of a unified gas supply system. *Gazovaya promyshlennost*, 6(769), pp. 72–77. (In Russ.)
- Ermolaev A.I., Voronova V.V. (2013). Optimization of gas buffer volume during its underground storage. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v nefteyanoy promyshlennosti*, 4, pp. 38–43. (In Russ.)
- Fatemi S.M., Sohrabi M. (2012). Experimental and Theoretical Investigation of Water/Gas Relative Permeability Hysteresis: Applicable to Water Alternating Gas (WAG) injection and Gas Storage Processes. *Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition*, SPE-161827-MS. <https://doi.org/10.2118/161827-MS>
- Ghanizadeh A., Song C., Clarkson Ch.R., Younis A. (2021). Relative permeability of tight hydrocarbon systems: An experimental study. *Fuel*, 294, 119487. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119487>
- Khan S.A., Ermolaev A.I., Samuylova L.V., Zolotukhin M.V. (2008). Justification of buffer gas volumes for underground storage. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 2(34), pp. 36–46. (In Russ.)
- Kheyn A.L. (1975). Study on the petrophysical model of the process of cyclic operation of underground gas storage facilities in an aquifer. *Gazovaya promyshlennost*, 11, pp. 32–36. (In Russ.)
- Kjosavik A., Ringen J.K., Skjaeveland S.M. (2002). Relative Permeability Correlation for Mixed-Wet Reservoirs. *SPE Journal*, 7(1), pp. 49–58. <https://doi.org/10.2118/77328-PA>
- Lurie M.V., Didkovskaya A.S., Vegera A.I. (2004). Analysis of the operation of underground gas storage facilities based on hysteresis diagrams. *Izvestiya VUZov «Neft' i gaz»*, 4, pp. 63–72. (In Russ.)
- Mikhaylovskiy A.A. (2010). Scientific basis for regulating and controlling the amount of gas in porous layers of underground storage. Dr. Tech. Sci. Diss. Moscow, 411 p. (In Russ.)

Ponomarev A.I., Malyshev V.L., Shayakhmetov A.I. (2020). Estimation of the undrained volume of buffer gas when creating an underground gas storage facility in a depleted gas condensate reservoir. *Current issues in the study of oil and gas reservoir systems. Proc. III Int. scientific-practical conf.* Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 120 p. (In Russ.)

Ponomarev A.I., Shayakhmetov A.I., Malyshev V.L., et al. (2022). Current issues in the creation and operation of underground gas storage in depleted gas condensate fields. *Current issues in the study of oil and gas reservoir systems. Proc. IV International. scientific-practical conf.* Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 27 p. (In Russ.)

Ponomarev A., Shayakhmetov A. (2018). Prediction flooding of well stock on the large gas fields with stratified heterogeneity. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, SPE-191658-18RPTC-MS. <https://doi.org/10.2118/191658-18RPTC-MS>

Ruban G.N. (2016). Geological and technological control of underground gas storage. Moscow: Research Center of the Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin, 207 p. (In Russ.)

Shayakhmetov A., Ponomarev A. (2018). Prediction flooding of well stock on the large gas fields with stratified heterogeneity. Society of Petroleum Engineers. *SPE Russian Petroleum Technology Conference 2018*. Moscow. DOI:10.2118/191658-18rptc-ms.

Wang J., Fu J., Xie J., Wang J. (2020). Quantitative characterisation of gas loss and numerical simulations of underground gas storage based on gas displacement experiments performed with systems of small-core devices connected in series. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 81, 103495. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103495>

Zakirov S.N., Fayzrakhmanov R.R., Somov Yu.M. (2002). Patterns of periodic displacement of gas by water and water by gas. *Gazovaya promyshlennost*, 11, pp. 35–37. (In Russ.)

About the Authors

Aydar R. Gaysin – Lecturer, Department of the Development and operation of gas and oil-gas condensate fields, Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russian Federation
e-mail: ramilka112@mail.ru

Airat I. Shayahmetov – Cand. Sci. (Technical Sciences), Associate Professor, Department of the Development and operation of gas and oil-gas condensate fields, Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russian Federation
e-mail: airat_shayahmeto@mail.ru

Aleksandr I. Ponomarev – Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Head of the Department of the Development and operation of gas and oil-gas condensate fields, Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russian Federation
e-mail: pnmrv@mail.ru

Victor L. Malyshev – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of the Development and operation of gas and oil-gas condensate fields, Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russian Federation
e-mail: victor.l.malyshev@gmail.com

Elena F. Moiseeva – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of the Development and operation of gas and oil-gas condensate fields, Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russian Federation
e-mail: elena.f.moiseeva@gmail.com

Manuscript received 2 May 2023;

Accepted 28 February 2024;

Published 30 March 2024