Разработка методики оценочного 3D геолого-технологического моделирования подземного хранения водорода совместно с метаном с учетом жизнедеятельности бактерий

Д.П. Аникеев*, Э.С. Закиров, И.М. Индрупский, Э.С. Аникеева Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия E-mail: *anikeev@ogri.ru

Аннотация. Статья посвящена моделированию подземного хранения водородно-метановой смеси. Предложен приближенный подход к 3D геолого-технологическому моделированию влияния деятельности бактерий на закачку и сохранность газов в подземных хранилищах водорода. Изучены возможности использования для этой задачи современных программ 3D гидродинамического моделирования (симуляторов) с косвенным учетом эволюции бактериальной колонии и потребления ею компонентов газовой смеси через механизм псевдохимических реакций.

Ключевые слова: водород, подземное хранение водорода, подземное хранилище водорода, бактерии, сульфатредукция, сульфатредукторы, псевдокомпонент, псевдохимические реакции.

Для цитирования: *Аникеев Д.П., Закиров Э.С., Индрупский И.М., Аникеева Э.С.* Разработка методики оценочного 3D геолого-технологического моделирования подземного хранения водорода совместно с метаном с учетом жизнедеятельности бактерий // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. Вып. 3(38). С. 39–55. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-38.art4

Введение

Вопросы создания подземных хранилищ водорода (ПХВ) или Underground hydrogen storage facilities (англ.) и выбора потенциальных объектов для их строительства активно поднимаются в научной литературе. В ряде публикаций рассматриваются различные объекты как кандидаты для создания ПХВ.

В работе [1] приводятся результаты ранжирования семидесяти семи возможных объектов на территории Польши. Одиннадцать из них относятся к отложениям солей, четырнадцать – к водоносным горизонтам, двадцать два – к нефтяным и восемнадцать – к газовым залежам, объектам разной стадии выработки запасов углеводородов. В более поздней работе по одному из рассмотренных в [1] объектов были представлены результаты моделирования водорода закачки водоносный пласт. Отмечено, в что растекание кровли пласта газа вдоль позволяет увеличить коэффициент не обратного извлечения газа (водорода) более чем на 40% [2].

В публикациях [3, 4] представлены результаты 3D секторного геолого-технологического моделирования эффективного подземного хранения водорода с метаном в водоносном пласте за счет активного воздействия на процесс системой различных по назначению скважин, а также оценка возможных потерь водорода из хранилища через покрышку за счет диффузионных явлений и, предположительно, слабой проницаемости ee для газовой фазы.

При хорошей сохранности покрышки потери водорода являются несущественными даже при ненулевой проницаемости и учете диффузии [4]. Полученные результаты моделирования согласуются с фактическими данными об отсутствии утечек водорода на пилотном проекте ПХВ в подземной каверне компании Air Liquide (Бомонт, Texac).

В работах [5, 6] представлены десятки возможных реакций с участием бактерий в пласте.

При отсутствии углеводородов пластовые воды могут быть источником бактерий и различных реакций [7].

В работе [5] рассмотрены скорости преобразования водорода в питательной и пористой средах при воздействии на среду определенных видов бактерий. Процессы в питательной среде могут происходить на несколько порядков быстрее, чем в породе.

Авторы работы [8] предприняли попытку рассмотреть объем потерь водорода в хранилище как функцию времени, но такие аналитические решения не учитывают сложного строения объекта и динамику формирования запасов водорода.

Эффективным способом подавления роста популяций бактерий является выбор объектов с высокой температурой пласта. По данным работы [5], при температуре выше 122 °С бактерии в пласте гибнут. Из 42 объектов-кандидатов для организации подземного хранилища водорода по этому критерию подошли только 5. При более низких температурах, как, к примеру, показано в работе [9], где исследована скорость потребления водорода при 80 °С, процесс может продолжаться десятки лет. В результатах, представленных в статье [10], приводятся данные о бактериях, зафиксированных в пласте при температуре 97 °C.

Существенной проблемой при прямом моделировании деятельности каждой группы бактерий является необходимость наличия данных о минеральном составе пород, так как некоторые разновидности бактерий потребляют отдельные компоненты минералов. Оценить их количество, распространенность по коллектору И доступность для бактериальных культур достаточно сложно из-за отсутствия данных в межскважинном пространстве.

Количественное моделирование преобразования В пласте закачиваемых химических соединений с учетом процесса жизнедеятельности бактерий представляет собой на сегодняшний день скорее искусство, чем науку. Профессор М.Б. Панфилов, более 15 лет занимающийся проектами подземных хранилищ городского газа И подземного преобразования углекислого газа в Европе, считает*, что потребности В исходной информации для моделирования конкретных объектов мере микробиологами должной в не удовлетворяются. Данных по «химическим» преобразованиям веществ бактериями для математического моделирования недостаточно. Более того, задача получения необходимых для математиковгидродинамиков исходных зависимостей пока не воспринимается микробиологами как Фактически, актуальная. имеет место существенный разрыв в целях исследований представителей различных научных направлений. Каждый специалист решает свою задачу, не интегрируя ее в единую комплексной количественной проблему оценки жизненного цикла ПХВ.*

^{*} Выступление М.Б. Панфилова на заседании Круглого стола ежегодной конференции Международного общества инженеров-нефтяников SPE Russian Petroleum Technology Conference, 20.10.2021.

Таким образом, хотя превращения, связанные с деятельностью бактерий, могут быть представлены в виде химических и математических формул, для достоверного хватает количественного прогноза не ланных. Отсутствует информация лля верификации И настройки моделей по скорости и интенсивности процессов, имеющих место в пласте.

В данной статье сделана попытка созлания приближенного подхода моделированию ПХВ метаном к с учетом деятельности бактерий, с использованием современных с пакетов 3D гидродинамического моделирования (симуляторов). Предлагается ограниченный по возможностям, но доступный И настройке понятный в инструмент особенностей исследования некоторых процессов в ПХВ.

Разработка приближенного подхода к 3D геолого-технологическому моделированию ПХВ с метаном с учетом деятельности бактерий

Одним из наиболее важных типов преобразований химических с участием бактерий для условий ПХВ является сульфатредукция с участием ряда разновидностей сульфатредуцирующих бактерий (сульфатредукторов). Именно приближенном моделировании на деятельности указанного класса бактерий сосредоточимся в данной статье.

При этом предлагаемый подход можно распространить и на другие классы микроорганизмов с различными видами химических преобразований.

Важно подчеркнуть, что целью работы не является точная количественная оценка бактериального воздействия в условиях конкретного ПХВ. Авторами рассматривалась реакция сульфатредукции следующего вида:

$$5H_2 + SO_4^2 \rightarrow H_2S + 4H_2O \tag{1}$$

в двух вариантах.

В первом случае химическая реакция (1)формально моделировала процесс превращения водорода В сероводород процессе жизнедеятельности в микроорганизмов, но при этом не учитывалось влияние роста и уменьшения популяции бактерий. Очевидно, что такой стандартный «химический» подход применим рассматриваемых не для процессов используется только И для первичного анализа.

Во втором случае был предложен приближенный подход для учета изменения популяции бактерий во взаимосвязи с химическими преобразованиями. Поскольку непосредственное моделирование бактериальных процессов недоступно в распространенных гидродинамических приближенно симуляторах, оно осуществлялось путем задания пары следующих химических реакций:

 $5H_2+SO_4^{2-}+Bakt \rightarrow H_2S+4H_2O+A \times Bakt,$ (2a)

$$0H_2 + SO_4^{2-} + Fakt \rightarrow SO_4^{2-} + B \times Fakt, \qquad (26)$$

где A и B – стехиометрические коэффициенты.

Реакция (2а) описывает сульфатредукцию с ростом популяции бактерий (белковой массы) в условиях наличия питательной среды (водорода), а (2б) – естественное сокращение популяции за счет гибели бактерий.

В отличие от реакции (1), реакции (2а) и (2б) могут протекать только при наличии компонента Бакт в сеточной ячейке. В результате реакций (2а)-(2б) популяция бактерий (концентрация компонента Бакт) может увеличиваться или уменьшаться. Стехиометрические коэффициенты А и В регулируют интенсивность роста и сокращения популяции в случаях (2а) и (2б). Для тестирования подхода в базовом варианте расчета (настроенном по умолчанию) задавались следующие значения:

A = 1,1; B = 0,85.

Влияние коэффициентов на процесс рассматривается ниже. В практических расчетах они могут определяться путем настройки модели на экспериментальные микробиологические данные.

Формулы (1),(2a), (26) не представляют реакции в чисто химическом смысле, они лишь описывают процесс преобразования вещества под действием бактерий. В частности, в них не соблюдаются законы сохранения массы энергии. И Формулы следует читать следующим образом:

H₂, H₂S и H₂O – компоненты: водород, сероводород и вода, соответственно;

SO₄²⁻ – псевдокомпонент, представляющий растворенные в пластовой воде сульфат-анионы.

Эти компоненты вступают в химические реакции, производя соответствующие продукты реакции.

H₂, H₂S и H₂O являются стандартными химическими компонентами, содержание которых В газовой И водной фазах встроенными рассчитывается методами симулятора ИЗ условий фазового равновесия Псевдокомпонент газ-вода.

SO₄²⁻ предполагается содержащимся только в водной фазе.

Более сложная ситуация с псевдокомпонентом Бакт. Поскольку он должен отражать локальное содержание сульфатредуцирующих бактерий в элементе пласта, его следовало бы отнести к водной фазе (а также, возможно, учесть адсорбциюдесорбцию породы). на поверхности «Реакция гибели» (2б) подразумевает, что закачки водорода в будущее еще до хранилище концентрация компонента Бакт в пластовой воде должна стремиться к нулю при любой ненулевой концентрации сульфатанионов, следовательно, к моменту закачки водорода сульфатредукция (2а) окажется невозможной.

Чтобы избежать данной проблемы, компонент Бакт формально рассматривается содержащимся не в водной, а в закачиваемой в хранилище газовой фазе. Фактически, его содержание необходимо трактовать не как реальную концентрацию бактерий, а как параметр, отражающий возможную интенсивность вызванной бактериями сульфатредукции в локальном объеме пласта при контакте водорода с растворенными в воде сульфат-анионами. Учитывая, что и псевдокомпонент Бакт, и водород содержатся в газовой фазе, заданное соотношение ИХ концентраций в закачиваемом газе в комбинации со значениями А и В в формулах соответствуют интенсивности (2a)–(2b)сульфатредукции и темпу роста/сокращения колонии для начальных условий в пласте и заданной концентрации водорода.

В дальнейшем уравнения (2а)–(2б) определяют интенсивность сульфатредукции, отслеживаемую по динамике условной концентрации псевдокомпонента Бакт, но фактически связанную с изменением реальной локальной концентрации бактерий.

Серьезным недостатком такого подхода является проблема возможного переноса в пласте повышенных псевдокомпонента концентрации Бакт, сгенерированных «реакцией» (2а) с газовой, а не водной фазой. Однако, как показывают выполненные тестовые расчеты, подобных эффектов пока не наблюдалось. Повидимому, это связано с ограниченными возможностями роста популяции в условиях доступного ресурса реагентов в левой части формулы (2а). Вопрос оценки границ практического применения подхода требует отдельного рассмотрения.

В представленных далее примерах расчетов концентрация псевдокомпонента Бакт в закачиваемом газе принималась на 1%. При условном уровне этом она оказывала влияния практически не на свойства газовой фазы, и численное значение процентной концентрации Бакт в дальнейшем можно было трактовать как текущую локальную интенсивность сульфатредукции, нормированную на ее величину для начальных условий пласта при исходной закачиваемой концентрации водорода.

По результатам расчетов можно говорить, что в качестве маркеров протекания процессов сульфатредукции при использовании уравнения (1) может использоваться концентрация компонента H₂S, а при использовании уравнений (2а)-(2б) – концентрация компонента Бакт.

Описанный подход был реализован в гидродинамическом симуляторе RFD tNavigator с использованием стандартной опции учета химических реакций REACTION. Эта опция позволяет учитывать кинетику реакций с заданием относительного параметра скорости реакции. В данном случае скорость реакции соответствует темпу протекания процесса сульфатредукции. Для оценки чувствительности каждой из моделей (1) и (2а)-(2б) к скорости реакции были рассмотрены варианты с изменением относительного параметра 300 скорости реакции от 1 до (безразмерный множитель). Из теории ремасштабирования (upscaling) следует, что кинетические параметры при моделировании химических реакций на мелком и крупном масштабах должны быть различны, и следует предпринимать определенные усилия, чтобы перенести параметры химических реакций с мелкого масштаба на крупный для использования В 3D гидродинамической модели. решения Без соответствующей задачи ремасштабирования, даже при наличии ланных 0 кинетике на мелком масштабе. необходима прямая оценка чувствительности, что в данном случае выполняется посредством указанного безразмерного параметра симулятора tNavigator.

Секторная 3D модель хранилища и технологические особенности сценариев создания ПХВ с метаном соответствуют представленным в публикациях [3, 4]. Использован один ИЗ сценариев формирования хранилища без барьерного Накопленная закачка заводнения. газа хранилише во всех вариантах в одинакова и составила 363,14 млн ст. м³ (м³ в стандартных условиях) за 1,5 года, закачку что включает первичную 181 млн ст. м³ метана с последующей закачкой газовой смеси CH_4-H_2 с молярной концентрацией водорода 10%. Накопленная закачка водорода 17.11 млн ст. м³.

В табл. 1 представлены запасы газа в пласте сопоставляемых вариантов расчета с реакцией (1) и разными значениями параметра скорости реакции на конец формирования хранилища.

Таблица 1

Показатель	Ед. изм.	Относительная скорость реакции (1)				
		1	10	50	100	300
Общие запасы газа в пласте	млн ст. м ³	353,353	353,078	353,150	353,192	353,237
Запасы газа в регионах 2+3	млн ст. м ³	151,161	151,223	151,323	151,225	151,195
Общие запасы водорода в пласте	млн ст. м ³	5,44	5,13	5,20	5,23	5,27

Запасы газа в пласте на конец формирования ПХВ

Авторы используют разбивку модели по регионам для оценки доступности запасов газа для обратного извлечения из хранилища. Схема расположения регионов FIPNUM (ключевое слово симулятора tNavigator) представлена рис. 1. на Как показано В работах [3, 4], основные доступные для обратного извлечения запасы находятся водорода в регионах 2 и 3.



Рис. 1. Схема выделения регионов доступности запасов газа в пласте для обратного извлечения из хранилища

В рассматриваемом сценарии для формирования более емкого ПХВ [3, 4] разгрузочные используются вододобывающие скважины. При значении параметра скорости реакции, равном 1, осуществляется добыча водорода вододобывающими скважинами, при значении 10 И выше нет. Во всех вариантах значительное (около 2/3

от объема закачки) количество водорода успевает сульфатредукцию. претерпеть В табл. 1 видно, что влияние параметра реакции скорости на запасы газа В хранилище является несущественным, так как гидродинамические процессы формирования хранилища протекают значительно медленнее, чем локальные «химические» преобразования.

На рис. 2 представлено распределение SO_4^{2-} концентрации псевдокомпонента пласте водной фазе В В до начала закачки (см. рис. 2a) газа и на конец формирования хранилища (см. рис. 2б) для одного из вариантов по относительной скорости химической реакции.





На рис. За показано распределение в пласте молярной плотности SO42- в тот же момент времени, что и на рис. 2б. Распределение насыщенности В пласте газом приведено рис. 3б. на В районе газонагнетательных скважин и локальных структурных поднятий, где в процессе закачки формируются наибольшие концентрации водорода, сульфат-анионы практически полностью расходуются на сульфатредукцию. Это происходит том числе счет В за предварительного оттеснения воды газом co снижением доступного количества SO₄²⁻ в объеме пласта, куда поступает закачиваемый метан с водородом (специфичный «прямолинейный» вид области изменения параметров границ на рис. За и 36 связан с особенностями учета протяженной внешней

водонапорной зоны в ограниченной по размерам модели).

На рис. 4 приведены распределения молярных плотностей H₂ и H₂S в газовой фазе. Как вилно ИЗ рисунка, распространение указанных компонентов пласте различается. Более тяжелый сероводород, формирующийся в результате сульфатредукции, в составе утяжеленной газовой фазы вытесняется в удаленные от скважин и пониженные на структуре области пласта последующими порциями закачиваемого водорода. В околоскважинных областях сероводород практически отсутствует, а концентрация водорода максимальна, что коррелируется с данными 2б и За: в этих на рис. областях преобразование водорода в какой-то момент прекращается из-за недостатка сульфатанионов.



Рис. 3. 3D модель пласта с распределением: а – молярной плотности компонента SO₄²⁻; б – насыщенности газом на момент окончания формирования ПХВ



Рис. 4. Распределение молярной плотности компонентов в газовой фазе: a – H₂; б – H₂S по кровле 3D модели пласта

б

а

На рис. 5 представлено распределение скорости реакции (1) на конец формирования ПХВ. Как следует из сопоставления с рис. 4а, преобразование водорода продолжается на некотором удалении от зоны закачки, где имеются одновременно SO₄²⁻, и H₂.



Рис. 5. Распределение скорости реакции для H₂ по кровле 3D модели пласта на момент окончания моделирования

Результаты расчетов жизненного цикла ПХВ, приведенные рис. 2-5,на соответствуют реакции (1) и не учитывают изменения популяции бактерий. Они показывают общие особенности протекания процессов в ПХВ, вызванные сульфатредукцией.

Далее рассмотрим расчеты для реакций (2a) и (2б).

В табл. 2 представлены запасы газа (в стандартных и пластовых условиях) на конец формирования ПХВ для трех моделируемых вариантов. В первом варианте отсутствуют реакции. Второй расчет предполагает протекание только реакции (2a) с ростом

популяции. Третий расчет выполнен с учетом обеих реакций (2а) и (2б). Все три расчета выполнены на одной модели, во всех и номинально реакции заданы вариантах, только первом расчете В скорость обеих реакций принята равной нулю. Это сделано для уменьшения влияния численных эффектов. В силу особенностей решения нелинейных задач внутренних алгоритмов И симулятора включение опции химических реакций может само по себе несколько изменять результаты расчетов (например, через влияние на размер временного шага).

Таблица 2

Babuaut paquata	Запа	Запасы, млн ст. м ³			
Бариант расчета	газа	в том числе водорода			
Без учета реакций сульфатредукции	363,14	17,112			
С учетом реакции сульфатредукции (2а)	353,589	5,27			
С учетом реакций (2а) и (2б)	356,211	10,78			

Запасы газа в пласте на конец создания ПХВ

Как видно из сравнения табл. 2 и табл. 1, без учета гибели бактерий – с одной реакцией (2а) – общие запасы газа (включая запасы водорода) в пласте примерно соответствуют вариантам с реакцией (1), где рост популяции не учитывается. В случае учета гибели бактерий – на основе реакций 2а и 26 – потери водорода на сульфатредукцию сокращаются с 2/3 до 1/3 от общего закачанного объема. Как следствие, запасы водорода на конец формирования хранилища при учете гибели бактерий примерно в 2 раза выше, чем в случае учета только реакции (2а).

а

б

Ha 6 рис. представлено распределение условной молярной плотности псевдокомпонента Бакт для второго и третьего вариантов из табл. 2 без учета (см. рис. 6а) и с учетом (см. рис. 6б) сокращения популяции сульфатредукторов. Шкалы на рисунках одинаковы. Видно, что на рис. 6б сульфатредукции потенциал для сохраняется только в ограниченных зонах. Максимальные значения концентрации Бакт здесь также ниже, чем на рис. ба, где сокращение популяции по реакции (26) не учитывается.



Рис. 6. Распределение условной молярной плотности псевдокомпонента Бакт на конец формирования ПХВ для вариантов: а – без учета сокращения популяции бактерий; б – с учетом сокращения популяции бактерий

Отметим еще раз, что представляемые результаты носят качественный характер, иллюстрируют особенности предлагаемого подхода к моделированию. Количественные оценки являются условными, коэффициенты А и В в уравнениях (2а) и (2б) требуют уточнения по фактическим данным.

При принятых значениях коэффициентов сокращение активной популяции за счет гибели бактерий – уравнение (26) – происходит быстрее, чем рост популяции при наличии «питания» – уравнение (2а). Это иллюстрирует рис. 7, где показаны распределения скорости реакции для компонента Бакт

а

б

на конец моделирования для вариантов без учета (см. рис. 7а) и с учетом (см. рис. 7б) «реакции гибели» (2б). Из-за разницы в скоростях реакций для указанных вариантов использованы разные цветовые шкалы, но на обоих рисунках цвет в периферийной зоне модели соответствует нулевой скорости. Видно, что конфигурация области продолжающихся реакций подобна представленной на рис. 5. Если при учете обеих реакций на «фронте» происходит сокращение популяции (отрицательная скорость), то без учета реакции (2б) – прирост популяции (положительная скорость).



Рис. 7. Скорость реакции (2а) на конец формирования ПХВ для вариантов: а – без учета гибели бактерий; б – с учетом гибели бактерий

На рис. 8 приведены карты относительной концентрации SO₄²⁻ в воде (по отношению к начальной концентрации), построенные по кровле пласта, на разные даты в процессе формирования ПХВ для

варианта расчета с учетом обеих реакций (2a) и (2б). Сравнение карт на разные даты позволяет увидеть, как динамически растет область, где реакции прекращаются из-за исчерпания сульфат-анионов.



Рис. 8. Карты концентрации SO4²⁻ в воде через: а — 13 месяцев; б — 15 месяцев; в — 17 месяцев с начала моделирования

Таким образом, основные качественные закономерности, полученные реакцией В расчетах с (1),учета сохраняются И В случае популяции прироста И сокращения сульфатредукторов по реакциям (2a)и (2б).

Анализ чувствительности к параметрам уравнений 2а и 2б

В табл. 3 представлены три варианта для оценки влияния соотношения «стехиометрических» параметров А и В для псевдокомпонента Бакт в правой части уравнений реакций (2а) и (2б).

Таблица 3

Вариант	Коэффициент А в уравнении (2а)	Коэффициент В в уравнении (2б)	Произведение A×B
1	1,1	0,85	0,935
2	1,2	0,85	1,02
3	1,1	0,95	1,045

Значения коэффициентов А и В для уравнений (2а) и (2б)

Из приведенных выше результатов можно предположить следующее. С одной стороны, важное значение абсолютные имеют значения данных коэффициентов, определяющие темпы роста и сокращения популяции сульфатредукторов. С другой стороны, существенно преобладание положительного или отрицательного эффектов в изменении популяции согласно уравнениям (2a) и (2б). Это преобладание отражает произведение коэффициентов А и В в последнем столбце табл. 3. Если оно больше 1, то прирост популяции по реакции (2а) преобладает над ее сокращением по реакции (2б); если меньше 1, то наоборот: сокращение популяции сульфатредукторов опережает рост.

На рис. 9 представлены карты (с осреднением по толщине пласта) относительной концентрации псевдокомпонента Бакт (по отношению

условной начальной концентрации к в газовой фазе) на конец пятилетнего срока простоя с момента завершения создания ПХВ. Для всех трех вариантов расчета используется единая цветовая шкала. Видно, что качественно характер формирующихся областей близкий, но вариант 3 ожидаемо характеризуется наибольшим их распространением И более высокими значениями концентраций компонента Бакт вслелствие наибольшей величины произведения коэффициентов А и В.



Рис. 9. Относительная доля компонента Бакт в газе после 5 лет простоя (осреднение по толщине пласта): а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

Примечание: синий цвет соответствует нулевой концентрации для разных значений коэффициентов

Запасы водорода (в пересчете на стандартные условия) через 5 лет простоя сформированного ПХВ составляют по вариантам: 9,578; 9,637 и 7,00 млн м³, соответственно. Существенно более высокие, по сравнению с другими вариантами, потери 3 водорода в варианте связаны с повышенными концентрациями компонента Бакт (см. рис. 9).

На рис. 10а показана динамика изменения запасов водорода в ПХВ в процессе его формирования и простоя

трех вариантов. Для оценки для простоя ПХВ влияния длительности И 3 были дополнительно варианты 1 рассчитаны 15 на срок лет. Соответствующие зависимости показаны рис. 10б. Как видно ИЗ рис. 10б. на с течением времени зависимости «выполаживаются» И запасы водорода постепенно стабилизируются, но связанные сульфатредукцией потери полностью с прекращаются даже через не 15 лет с момента формирования ПХВ.



Рис. 10. Динамика запасов водорода в пласте (в пересчете на стандартные условия) при формировании ПХВ и в течение периода простоя (хранения): а – варианты 1-3 в течение 5 лет; б – варианты 1 и 3 в течение 15 лет

Заключение

В работе предложен приближенный подход к моделированию ПХВ с метаном с учетом жизнедеятельности бактерий на основе инструментария псевдохимических реакций. Представленные количественные результаты не могут быть использованы для оценок реальных объектов, они служат апробации рассматриваемого для моделирования метода влияния сульфатредуцирующих бактерий на потери

водорода в подземных хранилищах газа средствами с метаном современных гидродинамических симуляторов, а также для качественного анализа некоторых особенностей формирования ПХВ с учетом процессов сульфатредукции. Вопросы о границах применимости предлагаемых решений и специфике настройки модели условия данные конкретных на И реальных объектов требуют дальнейшего исследования.

Благодарности

Авторы благодарят компанию RockFlowDynamics за возможность использования программного обеспечения RFD tNavigator на правах академической лицензии.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Научное обоснование влияния гидрохимических и микробиологических процессов на развитие коррозионных явлений при сонахождении водорода и метана в широком диапазоне концентраций геологических объектах различного muna», № 122022800276-2, в авторы Аникеев Д.П., Индрупский И.М.; тема «Совершенствование методов моделирования, лабораторных и промысловых исследований для создания новых технологий эффективного экологически чистого извлечения углеводородов в сложных горно-геологических условиях», № 122022800272-4, авторы Закиров Э.С., Аникеева Э.С.).

Литература

1. Lewandowska-Śmierzchalska J., Tarkowski R., Uliasz-Misia B. Screening and ranking framework for underground hydrogen storage site selection in Poland // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43, No. 9. P. 4401–4414. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.089

2. *Luboń K., Tarkowski R.* Numerical simulation of hydrogen injection and withdrawal to and from a deep aquifer in NW Poland // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45, No. 3. P. 2068–2083. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.055

3. *Abukova L.A., Zakirov S.N., Anikeev D.P., Zakirov E.S.* Formation of an effective hydrogen storage in an aquifer and control of its parameters // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, 26–29 October 2020. Paper SPE-201999-MS. 17 p. https://doi.org/10.2118/201999-MS

4. *Anikeev D.P., Zakirov E.S., Indrupskiy I.M., Anikeeva E.S.* Estimation of diffusion losses of hydrogen during the creation of its effective storage in an aquifer // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, 12–15 October 2021. Paper SPE-206614-MS. 19 p. https://doi.org/10.2118/206614-MS

5. *Heinemann N., Alcalde J., Miocic J.M.* et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges // Energy & Environmental Science. 2021. Vol. 14, No. 2. P. 853–864. https://doi.org/10.1039/d0ee03536j

6. *Magot M., Ollivier B., Patel B.K.C.* Microbiology of petroleum reservoirs // Antonie van Leeuwenhoek. 2000. Vol. 77, No. 2. P. 103–116. https://doi.org/10.1023/A:1002434330514

7. *Лущаева И.В.* Экология сульфатредуцирующих бактерий и их геохимическая деятельность в подземных водах палеогеновых отложений Обь-Томского междуречья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2007. 23 с.

8. *Amid A., Mignard D., Wilkinson M.* Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41, No. 12. P. 5549–5558. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.036

9. *Flesch S., Pudlo D., Albrecht D.* et al. Hydrogen underground storage – Petrographic and petrophysical variations in reservoir sandstones from laboratory experiments under simulated reservoir conditions // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43, No. 45. P. 20822–20835. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.112

10. *Panfilov M*. Underground and pipeline hydrogen storage // Compendium of hydrogen energy: Vol. 2: Hydrogen storage, distribution and infrastructure / Ed. by R.B. Gupta, A. Basile, T.N. Veziroğlu. Sawstone: Woodhead Publishing, 2016. P. 91–115.

Development of method for 3D geotechnological modeling of underground hydrogen storage with methane taking into account bacterial activity

D.P. Anikeev*, E.S. Zakirov, I.M. Indrupskiy, E.S. Anikeeva

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia E-mail: *anikeev@ogri.ru

Abstract. The article is devoted to modeling of the underground storage of hydrogen-methane mixture. An approximate approach to 3D geotechnical modeling of the influence of bacterial activity on the injection and storage of gases in underground hydrogen storage facilities is proposed. The authors explore the possibility of using modern 3D flow simulation software (simulators) for this purpose, with indirect account for bacterial colony evolution and its consumption of the gas mixture components through the mechanism of pseudochemical reactions.

Keywords: hydrogen, underground hydrogen storage, underground hydrogen storage facility, bacteria, sulfate reduction, sulfate reducers, pseudocomponent, pseudochemical reactions.

Citation: Anikeev D.P., Zakirov E.S., Indrupskiy I.M., Anikeeva E.S. Development of method for 3D geotechnological modeling of underground hydrogen storage with methane taking into account bacterial activity // Actual Problems of Oil and Gas. 2022. Iss. 3(38). P. 39–55. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-38.art4 (In Russ.).

References

1. Lewandowska-Śmierzchalska J., Tarkowski R., Uliasz-Misia B. Screening and ranking framework for underground hydrogen storage site selection in Poland // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43, No. 9. P. 4401–4414. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.089

2. *Luboń K., Tarkowski R.* Numerical simulation of hydrogen injection and withdrawal to and from a deep aquifer in NW Poland // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45, No. 3. P. 2068–2083. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.055

3. *Abukova L.A., Zakirov S.N., Anikeev D.P., Zakirov E.S.* Formation of an effective hydrogen storage in an aquifer and control of its parameters // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, 26–29 October 2020. Paper SPE-201999-MS. 17 p. https://doi.org/10.2118/201999-MS

4. *Anikeev D.P., Zakirov E.S., Indrupskiy I.M., Anikeeva E.S.* Estimation of diffusion losses of hydrogen during the creation of its effective storage in an aquifer // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, 12–15 October 2021. Paper SPE-206614-MS. 19 p. https://doi.org/10.2118/206614-MS

5. *Heinemann N., Alcalde J., Miocic J.M.* et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges // Energy & Environmental Science. 2021. Vol. 14, No. 2. P. 853–864. https://doi.org/10.1039/d0ee03536j

6. *Magot M., Ollivier B., Patel B.K.C.* Microbiology of petroleum reservoirs // Antonie van Leeuwenhoek. 2000. Vol. 77, No. 2. P. 103–116. https://doi.org/10.1023/A:1002434330514

7. *Lushchaeeva I.V.* Ecology of sulfate-reducing bacteria and their geochemical activity in the underground waters of Paleogene deposits of the Ob-Tom interfluve: Synopsis of Ph.D. thesis. Tomsk, 2007. 23 p. (In Russ.).

8. *Amid A., Mignard D., Wilkinson M.* Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41, No. 12. P. 5549–5558. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.036

9. *Flesch S., Pudlo D., Albrecht D.* et al. Hydrogen underground storage – Petrographic and petrophysical variations in reservoir sandstones from laboratory experiments under simulated reservoir conditions // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43, No. 45. P. 20822–20835. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.112

10. *Panfilov M*. Underground and pipeline hydrogen storage // Compendium of hydrogen energy: Vol. 2: Hydrogen storage, distribution and infrastructure / Ed. by R.B. Gupta, A. Basile, T.N. Veziroğlu. Sawstone: Woodhead Publishing, 2016. P. 91–115.