

Гидрохимические и микробиологические процессы, сопровождающие гибридное хранение водорода и метана в водоносных горизонтах

Л.А. Абукова*, Е.А. Сафарова, Д.С. Филиппова, В.Э. Поднек, Ю.Ф. Кияченко, И.К. Юдин, Г.Ю. Исаева, А.Д. Мельник, М.О. Бевзо
Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия
E-mail: *abukova@ipng.ru

Аннотация. Хранение водорода (метан-водородных смесей) в геологических формациях имеет преимущества в потенциальных объемах закачки и стоимостных параметрах технологических операций по сравнению с его размещением в наземных искусственных емкостях. Однако оно сопряжено с потенциальным риском проявления нежелательных гидрохимических и микробиологических реакций, приводящих к убыли водорода, производству диоксида углерода, геохимическим трансформациям пород коллекторов, коррозии скважинного оборудования. В рамках настоящей статьи излагаются результаты прогноза перечисленных явлений применительно к подземному хранению метан-водородных смесей в водоносных горизонтах, содержащих высокоминерализованную пластовую воду. Подобный анализ важен и для оценки последствий гибридного хранения водорода и метана в соленосных подземных пещерах.

Ключевые слова: водород, метан, подземные хранилища газа, метаногенез, сульфатредукция, углекислотная коррозия

Для цитирования: Абукова Л.А., Сафарова Е.А., Филиппова Д.С., Поднек В.Э., Кияченко Ю.Ф., Юдин И.К., Исаева Г.Ю., Мельник А.Д., Бевзо М.О. Гидрохимические и микробиологические процессы, сопровождающие гибридное хранение водорода и метана в водоносных горизонтах // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. Вып. 3(42). С. 221–234. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art14>

Введение

В концепции развития водородной энергетики в РФ сформулированы стратегические цели на ближайшую и более отдаленную перспективу по использованию водорода в качестве эффективного энергоносителя и сырья для химической промышленности. В совокупности задач, решение которых обеспечит эффективное внедрение водородных технологий, вопросам хранения этого газа уделено большое внимание. В мире реализуются различные проекты по временному содержанию водорода в недрах Земли (HyUnder, H2STORE, SUN.STORAGE, Huchico и др.) [1, 2]. К примеру, одно из них обеспечивает в Великобритании

сезонное размещение в геологических формациях миллиардов кубометров водорода в природных условиях [3]. Оценены достоинства и недостатки хранения водорода в водоносных горизонтах, истощенных газовых месторождениях с терригенными коллекторами и соленосных пещерах [2, 4].

В настоящее время повысился интерес к гибриднему хранению водорода с другими газами, прежде всего с метаном. Однако даже скромный опыт реализации такого технологического решения говорит о возможности возникновения рисков убыли водорода, проявления углекислотной и сульфатной коррозии пород и скважинного оборудования [4–6].

Поэтому необходимо проведение детального анализа условий хранения метан-водородных смесей применительно к различным типам природных резервуаров.

В рамках настоящей статьи отражены результаты прогноза наиболее вероятных гидрохимических и микробиологических процессов, которые могут сопровождать сонахождение метана и водорода в геологической среде.

Теоретической основой работы послужили исследования В.И. Вернадского,

А.Е. Ферсмана, Г.Л. Стадникова, В.А. Соколова, В.И. Молчанова, С.П. Левшуновой, М.Б. Панфилова, В.П. Исаева, О.К. Навроцкого, V.M. Goldschmidt, NS.W. Lu, N.S. Muhammed, C. Neal, R. Sugisaki, R. Tarkowski, N. Heinemann, C. Hemme, A.E. Yecta, D. Zivar, V. Zgonnik по изучению поведения водорода в различных природных геолого-тектонических обстановках, а также его физико-химической активности под воздействием техногенных факторов (рис. 1).

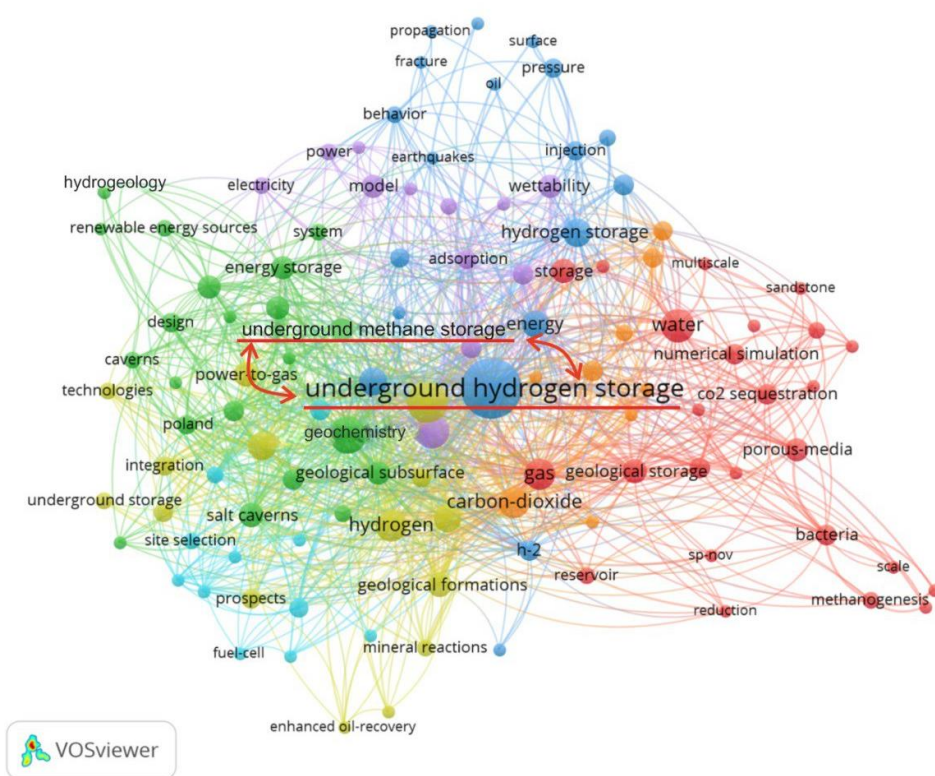
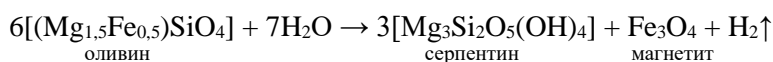
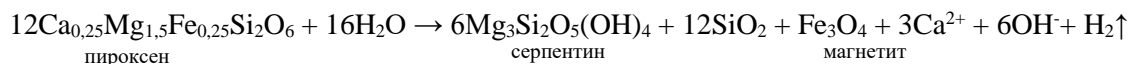


Рис. 1. Библиометрическая карта публикаций в предметной области «подземное хранение водорода» (источник: Scopus, инструментарий: VOSviewer)

Поскольку в России еще не созданы хранилища метан-водородных смесей и, как следствие, отсутствует непосредственная возможность мониторинга стабильности геохимического состава и объемов размещенных на подземное хранение газов, предварительный прогноз последствий совместного содержания водорода и метана

в едином геологическом резервуаре можно базировать на анализе (i) геохимических и гидрохимических условий генерации и аккумуляции водорода в естественных геолого-тектонических условиях; (ii) микробиологических процессов, связанных с участием водорода в метаболизме основных бактериологических сообществ.

Геохимические и гидрогеологические процессы, сопровождающие генерацию и аккумуляцию водорода в естественных геолого-тектонических условиях. Среди природных геохимических процессов,

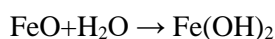


Прямые натурные наблюдения в рифтовых зонах Срединно-Атлантического хребта показали, что большие объемы абиогенно синтезированного водорода в процессе серпентинизации могут быть полностью утилизированы специфической хемоавтотрофной и гетеротрофной микрофлорой вблизи выходов гидротермальных растворов на дно океана [9].

Не менее активна реакция перехода оксида двухвалентного железа путем

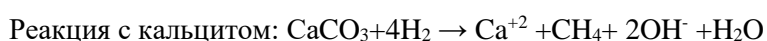
приводящих к генерации водорода, наиболее значим гидролиз основных и ультраосновных пород. Классическим примером подобной реакции служит взаимодействие оливина и пироксена с водой [7, 8]:

гидролиза в гематит, а гематита путем гидрирования – в магнетит [10]:



Наряду с реакциями водородообразования в геологических условиях широко распространены взаимодействия между породами, водами и растворенными газами, которые приводят к обратной картине – расходу водорода на восстановительные процессы.

Так, в низкоминерализованных водах возможны реакции солей угольной кислоты и молекулярного водорода с образованием метана и гидроксильной группы [11]:



Широко в геологической среде представлены и реакции восстановления сульфат иона водородом с образованием сульфидов. Сульфидные минералы, из которых пирит (FeS_2) является одним из наиболее распространенных, в присутствии водорода может превращаться в пирротин, макинавит или троилит (FeS) и ассоциироваться с H^+ до HS^- и H_2S [10]:



Аналогичные реакции протекают и в системе «порода ↔ поровые воды ↔ газ». В случае размещения в подземных резервуарах водород-метановой смеси из-за разницы в плотностях метана и водорода последний будет концентрироваться непосредственно под флюидоупорами, образуя с ними и поровыми водами достаточно большую площадь контакта.

Присутствие кислородсодержащих минералов в глинах обуславливает наличие на их поверхности отрицательного заряда, что определяет ориентацию дипольных молекул поровой воды в ближайшем к глине адсорбционном слое [12]. Поровые воды, адсорбируясь на поверхности зерен тонкодисперсных глинистых частиц, образуют двойной электрический слой, преграждающий свободное проникновение жидкостей и газов в микропористую среду [13]. Обращенные во внешнюю среду отрицательные заряды диполей молекул поровых вод (адсорбционного слоя) способны притягивать силами электростатического взаимодействия положительно заряженные ионы водорода. Это вызывает геохимические процессы с участием водорода. Например, реакция дедоломитизации при участии водорода приводит к повышению содержания метана и выпадению в осадок карбоната кальция [14]:



Реакция предполагает образование карбонатного цемента, чем обеспечивается снижение проницаемости пород флюидоупоров.

В целом, можно отметить, что вторичный эпигенез флюидовмещающих пород протекает как с выделением, так и с убылью водорода. Наиболее заметная убыль водорода происходит при контакте водорода с породообразующими минералами, в которых повышено содержание кальция, магния, серы и железа. В результате таких реакций усиливаются щелочные

свойства среды, что часто сопровождается выпадением нерастворимых осадков (например, карбонатов и сульфатов кальция, сульфидов железа и др.) и изменением фильтрационных свойств порового пространства коллекторов.

Микробиологические процессы, связанные с участием водорода в метаболизме основных бактериологических сообществ. Помимо рассмотренных выше абиотических механизмов генерации и потребления водорода в геологических формациях развиваются аналогичные процессы, обусловленные деятельностью микробиологических сообществ. Так, значительный ресурс генерации водорода в геосфере связан с разложением органических веществ (ОВ) [15–17]. Масштабы генерации водорода при катагенетической трансформации рассеянного и концентрированного ОВ зависят от разнообразия микробиологических сообществ природных экосистем геосферы [18]. Благодаря своим микроскопическим размерам и биологической адаптации к условиям широкого диапазона глубин, времени, температур и пластовых давлений, бактерии расселены по обширному пространству геологической среды, соответственно принимают участие в преобразовании различных литотипов осадочного чехла, в том числе терригенных формаций. Активно проявляет себя микробиологическая деятельность в системе «вода-порода» при генерации природных газов – метана, углекислого газа, азота, водорода, сероводорода [17–19]. Общая схема преобразования органического вещества под микробиологическим воздействием приведена ниже (табл. 1).

Таблица 1

Общая схема переработки органического материала в геологических условиях под действием микробиологических сообществ [16–21]

Этап (основной микробиологический процесс)	Основная стадия бактериологической переработки ОВ	Основные химические механизмы
Первый (ацидогенез)	Деструкция липидных компонентов органического вещества сопровождается выделением твердых и летучих жирных кислот	–
Второй (ацетогенез)	Разложение высокомолекулярных жирных кислот микроорганизмами до простых (низших) органических кислот путем гидролиза	$C_2H_5COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$ $5CH_3COOH + 8NO_3^- + 8H^+ \rightarrow 10CO_2 + 4N_2 + 14H_2O$
Третий (метаногенез)	В результате метаногенеза проходит реакция превращения водорода в метан с участием гидрокарбонат-иона (и/или диоксида углерода)	$HCO_3^- + 4H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ $4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$

Авторами на материалах подземных хранилищ метана, размещенных в водоносных горизонтах Московского гидрогеологического бассейна, выполнен прогноз развития механизма потребления

водорода микрофлорой, для которой в естественных условиях питательной средой являются органические кислоты, содержащиеся в природных водах (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав вод Московского гидрогеологического бассейна на примере проб воды, отобранных на Щелковском, Касимовском и Калужском подземных хранилищах газа (ПХГ) в 2020 г.

№ скважины	Глубина отбора проб, м	Минерализация, г/л	pH	Метанол	Этанол	Σ(C3-C4 спиртов)	Ацетат	Σ(C3-C5 лжк)
Щелковское ПХГ, щигровский горизонт								
67	900	124,04	7,23	474,6	7,21	4,5	22,95	11,75
105	950	136,57	6,41	41,2	15,93	0	55,14	20,46
162 нов.	1115	200,55	5,51	37,9	0	0	12,07	19,3
Касимовское ПХГ, нижнещигровский горизонт								
5	820	83,00	7,03	0,7	0	13,0	91,07	40,5
Калужское ПХГ, гдовский горизонт								
27	890	5,60	9,59	3,8	0	0	19,44	25,14
31	930	<2,63	6,02	17769,7	0,44		75,28	37,1
32	895	<2,63	6,59	92,9	2,78	2,2	38,05	29,08
43	890	17,34	6,90	611,3	5,50	1,1.	32,76	14,1
48	885	<2,63	9,48	6,3	0	0	19,50	24,74
121	970	65,40	8,83	108,6	9,38	0	66,47	17,88

Примечание: лжк – летучие жирные кислоты.

На материалах шигровского горизонта Щелковского ПХГ выполнено секвенирование по гену 16S РНК. Оно показало

широкое развитие сульфатредуцирующих бактерий в водной среде, химический состав представлен ниже (табл. 3).

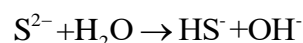
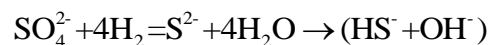
Таблица 3

**Результаты анализа химического состава отобранной пробы пластовой воды
(скв. 161 Щелковского ПХГ)**

Показатель, единица измерения	Количественные значения параметров
Общая минерализация (сухой остаток), г/дм ³	135
Гидрокарбонаты (НСО ₃), мг/дм ³	59
Хлорид-ион (Сl), мг/дм ³	79
Хлорид-ион в пересчете на NaCl, мг/дм ³	131
Сульфат-ион(SO ₄), мг/дм ³	1585
Калий (К), мг/дм ³	802
Кальций (Са), мг/дм ³	6932
Магний (Mg), мг/дм ³	1076
Железо общее (Fe), мг/дм ³	19,9

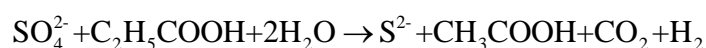
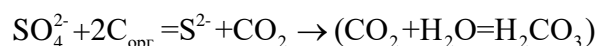
Еще один процесс – сульфатредукция – восстановление сульфатов с участием микроорганизмов может привести к потере водорода как в природных условиях, так и при его совместном хранении в подземных резервуарах [19, 20]. В реакциях сульфатредукции принимают участие разнообразные формы серы, часто присутствующие в породах продуктивных горизонтов углеводородных месторождений или подземных хранилищах газа, а также растворенные в подземных флюидах – пластовых, поровых, конденсационных водах. В любом состоянии сера – это нежелательный продукт не только для сохранности водорода, но и для целостности вмещающих пород. Ее поглощение бактериями в ходе реакций осуществляется только в водной среде. Геохимические последствия зависят от видов деятельности

микроорганизмов и энергетических источников их питания [22]. При автотрофной сульфатредукции, бактерии используют для своей жизнедеятельности простейшие элементы, например, водород:



Поэтому в результате таких реакций усиливаются щелочные свойства окружающих вод (за счет накопления гидроксильных ионов), повышается рН среды, что часто сопровождается выпадением нерастворимых осадков (например, карбонатов и сульфатов кальция, сульфидов железа и др.) и изменением фильтрационных свойств порового пространства коллекторов.

При гетеротрофной сульфатредукции микроорганизмы питаются только готовыми водорастворенными органическими элементами [19]:



Десульфатизация сначала подземных вод, а затем и вмещающих пород, вызванная переводом SO_4^{2-} в S^{2-} и обусловленная микробиологической деятельностью, может привести к таким последствиям:

1) разрушению минерального каркаса флюидовмещающих пород за счет растворения сульфатной (ангидриты) составляющей разреза (сульфатный карст);

2) декарбонатизации – коррозии карбонатного материала (карбонатный карст) – явления широко распространенного в нефтегазоносных отложениях;

3) коррозии и разрушения кварца, полевых шпатов и других минеральных

компонентов в результате агрессии CO_2 и органических кислот.

Геобиологические риски совместного хранения водорода с метаном должны проявляться практически при всех объемных соотношениях водорода, метана и продуктов жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов (углекислый газ, сероводород). При высоком объемном содержании водорода будут усилены риски водородного охрупчивания металлических конструкций, а по мере повышения в составе газов доли кислых компонентов активизируется сероводородная и углекислотная коррозия (рис. 2).

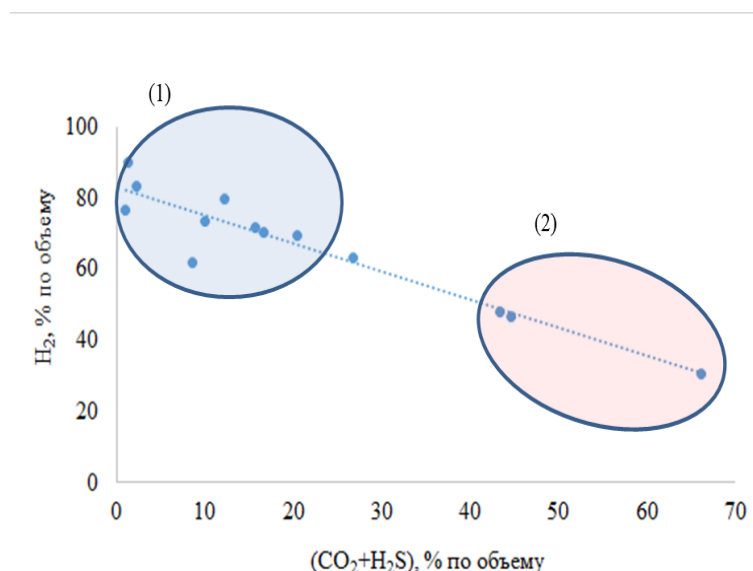


Рис. 2. Зависимость между содержанием CH_4 и $\Sigma(\text{CO}_2+\text{H}_2\text{S})$ в растворенных газах ниже-пермско-каменноугольного водоносного комплекса Оренбургского месторождения и области возможных рисков: (1) – водородного охрупчивания; (2) – углекислотной и сульфатной коррозии

Существенная роль водорода как питательной среды для сульфатредукторов наглядно видна по зависимости численности их популяции в водах щигровского горизонта Щелковского ПХГ (скв. 161) от количества введенного в систему водорода. С помощью спектрометра динамического рассеяния света Photocor Compact [24] выявлена динамика роста популяции микроорганизмов

в исследуемых водах при добавлении в газовую среду водорода. В этом случае активность микроорганизмов резко увеличивается, а по мере его расходования – снижается. Используемый метод основан на предположении о том, что плотность популяции микроорганизмов пропорциональна усредненному значению интенсивности светорассеяния.

На рис. 3 приведены временные зависимости интенсивности светорассеяния в жидкой среде, содержащей бактерии, в условных единицах (cps = count per second) для трех различных образцов после добавления в газовую среду в момент времени $t = 0$ одного и того же количества водорода. Наблюдаемые на рисунках выбросы интенсивности светорассеяния в первые часы после закачки водорода вызваны гидродинамическими возмущениями, обусловленными установкой

пробирки с образцом в прибор, седиментацией абиотических частиц и другими, не имеющими отношения к росту популяции, эффектами. Прямоугольниками отмечены участки, на которых через 5–6 часов после закачки водорода в исследуемую пробу пластовой воды после сглаживания значений интенсивности светорассеяния явно проявляются различные фазы классической кривой роста микробиологической популяции.

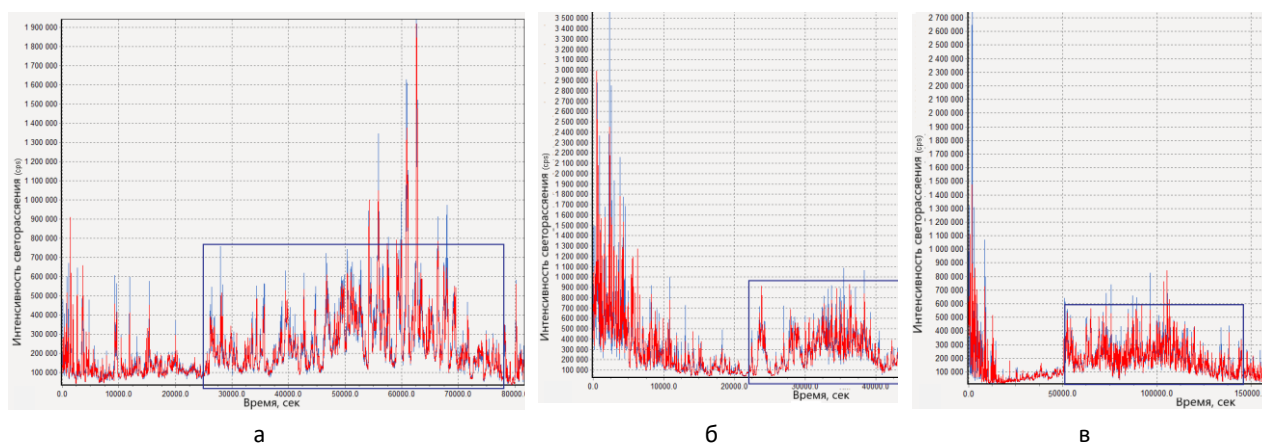


Рис. 3. Временные зависимости интенсивности светорассеяния в пластовой воде после добавления в газовую фазу одного и того же количества водорода (в момент времени $t = 0$ при трех разных мощностях лазерного излучения) для разных образцов: а – 1-й образец, б – 2-й образец, в – 3-й образец

Для выделения общего тренда изменения средней интенсивности светорассеяния (за который отвечают жизнеспособные бактерии) и, соответственно, временного изменения плотности популяции авторами было проведено сглаживание полученных значений интенсивности светорассеяния для трех образцов методом скользящего среднего по интервалу 2000 секунд.

Полученные с использованием указанной процедуры регулярные зависимости изменения приведенной плотности популяции от времени, отсчитанного с момента введения в газовую среду

водорода, представлены на рис. 4. Для полноценного сравнения временных периодов экспоненциальной фазы и фазы отмирания для различных образцов, плотности популяции приведены к своему максимальному значению, достигаемому в стационарной фазе.

Установленная авторами динамика роста бактериальной популяции ПХГ подтверждает тренд, соответствующий теоретическим предпосылкам схемы классической кривой роста микробиологической популяции и прогнозу этого процесса по отношению к конкретному промышленному объекту [6, 13].

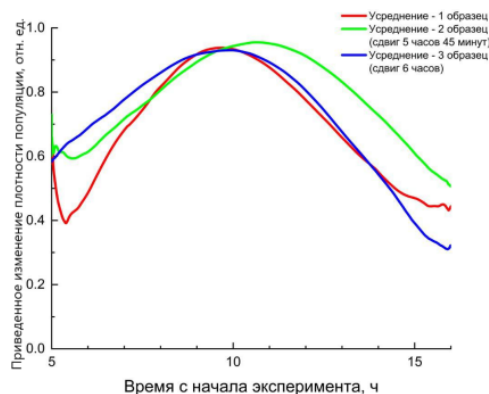


Рис. 4. Динамика роста приведенной плотности популяции микроорганизмов при закачке водорода в газовую среду по трем экспериментам

Заключение

При размещении объектов подземного хранения водорода совместно с метаном в водоносных горизонтах существует вероятность формирования сложной (в гидрохимическом и микробиологическом отношениях) обстановки конкуренции доминирующих микробиологических сообществ за пищевые ресурсы. В качестве последних могут выступать водород, органические кислоты и сульфаты подземных вод. Убыль водорода будет сопровождаться проявлениями карстообразования, углекислотной и сульфатной коррозии.

Учитывая стартовый характер научно-исследовательских работ по обоснованию

оптимальных условий подземного хранения водорода совместно с метаном, ближайшими задачами следует считать:

- дальнейшее совершенствование методики экспериментального изучения видов и масштабов воздействия на геологическую среду и инженерные сооружения, в том числе и при условии захоронения и утилизации углекислого газа;

- моделирование поведения микробиологических сообществ при подземном хранении водорода совместно с метаном (применительно к геолого-промышленным условиям конкретных объектов гибридного хранения H_2 и CH_4).

Статья написана в рамках выполнения государственного задания ИПНГ РАН (тема «Научное обоснование влияния гидрохимических и микробиологических процессов на развитие коррозионных явлений при сонахождении водорода и метана в широком диапазоне концентраций в геологических объектах различного типа», № 122022800276-2).

Литература

1. Muhammed N.S., Haq M.B., Al Shehri D.A. et al. Hydrogen storage in depleted gas reservoirs: A comprehensive review // Fuel. 2023. Vol. 337. P. 127032. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127032>
2. Zivar D., Kumar S., Foroozesh J. Underground hydrogen storage: A comprehensive review // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46. P. 23436–23462. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.138>

3. *Mouli-Castillo J., Heinemann N., Edlmann K.* Mapping geological hydrogen storage capacity and regional heating demands: An applied UK case study // *Applied Energy*. 2021. Vol. 283. P. 116348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116348>
4. *Tarkowski R.* Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 105. P. 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.051>
5. *Абукова Л.А., Абрамова О.П.* Прогноз гидрогеохимических эффектов в глинистых флюидоупорах при подземном хранении водорода с метаном // *Георесурсы*. 2021. Т. 23, № 1. С. 118–126. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.13>
6. *Филиппова Д.С.* Водород в геологической среде: особенности генерации и аккумуляции // *SOCAR Proceedings*. 2023. № S2. С. 6–13. <https://doi.org/10.5510/OGP2023SI200885>
7. *Мархинин Е.К.* Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
8. *Пуха В.В., Нивин В.А., Мокрушина О.Д.* Вариации концентраций молекулярного водорода в рыхлых отложениях Хибинского и Ловозерского массивов и их экзоконтактовых зон // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2022. № 19. С. 312–317. <https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.057>
9. *Леин А.Ю., Богданов Ю.А., Сагалевиц А.М.* и др. Новый тип гидротермального поля на Срединно-Атлантическом хребте (поле Лост-Сити, 30° с.ш.) // *Доклады Академии наук*. 2004. Т. 394, № 3. С. 380–383.
10. *Соколов В.А.* Геохимия газов земной коры и атмосферы. М.: Недра, 1966. 301 с.
11. *Hemme C., van Berk W.* Hydrogeochemical modeling to identify potential risks of underground hydrogen storage in depleted gas fields // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, No. 11. P. 2282. <https://doi.org/10.3390/app8112282>
12. *Вода в дисперсных системах / Под. ред. Б.В. Дерягина, Н.В. Чураева, Ф.Д. Овчаренко.* М.: Химия, 1989. 288 с.
13. *Королев В.А.* Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // *Соросовский образовательный журнал*. 1996. Т. 2, № 9. С. 79–85.
14. *Pichler M.P.* Assesment of hydrogen rock interaction during geological storage of CH₄-H₂ mixtures // *Second EAGE Sustainable Earth Sciences (SES) Conference and Exhibition, Pau, France, 30 September – 4 October 2013*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131594>
15. *Крамаренко Л.Е.* Геохимическое и поисковое значение микроорганизмов подземных вод. Л.: Недра, Ленинградское отделение, 1983. 181 с.
16. *Розанова Е.П., Кузнецов С.И.* Микрофлора нефтяных месторождений. М.: Наука, 1974. 198 с.
17. *Назина Т.Н., Абукова Л.А., Турова Т.П.* и др. Микробное разнообразие и возможная активность в водоносных горизонтах подземных хранилищ газа // *Микробиология*. 2021. Т. 90, № 5. С. 589–600. <https://doi.org/10.31857/S002636562105013X>
18. *Nazina T.N., Abukova L.A., Tourova T.P.* et al. Biodiversity and potential activity of microorganisms in underground gas storage horizons // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 13. P. 9945. <https://doi.org/10.3390/su15139945>
19. *Ranchou-Peyruse M., Auguet J., Mazière C.* et al. Geological gas-storage shapes deep life // *Environmental Microbiology*. 2019. Vol. 21, No. 10. P. 3953–3964. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14745>

20. *Cord-Ruwisch R., Kleinitz W., Widdel F.* Sulfate-reducing bacteria and their activities in oil production // *Journal of Petroleum Technology.* 1987. Vol. 39, No. 1. P. 97–106. <https://doi.org/10.2118/13554-PA>

21. *Truche L., Jodin-Caumon M.-C., Lerouge C. et al.* Sulphide mineral reactions in clay-rich rock induced by high hydrogen pressure. Application to disturbed or natural settings up to 250 °C and 30 bar // *Chemical Geology.* 2013. Vol. 351. P. 217–228. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.05.025>

22. *Абукова Л.А., Волож Ю.А., Дмитриевский А.Н., Антипов М.П.* Геофлюидодинамическая концепция поисков скоплений углеводородов в земной коре // *Геотектоника.* 2019. № 3. С. 79–91. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019379-91>

23. *Goldhaber M.B., Orr W.L.* Kinetic controls on thermochemical sulfate reduction as a source of sedimentary H₂S // *ACS Symposium Series.* 1995. Vol. 612. P. 412–425. <https://doi.org/10.1021/bk-1995-0612.ch023>

24. Photocor. Анализаторы размеров частиц, дзета-потенциала и молекулярной массы. <https://www.photocor.ru> (Дата обращения 18.09.2023).

Информация об авторах

Лейла Азретовна Абукова – д.г.-м.н., заведующая лабораторией, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, abukova@ipng.ru

Елисавета Александровна Сафарова – заведующая центром, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, safarova@ipng.ru

Дина Сергеевна Филиппова – научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, filippovads@ipng.ru

Виталий Эдуардович Поднек – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, podnek77@gmail.com

Юрий Федорович Кияченко – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, kiyatchenko@mail.ru

Игорь Кронидович Юдин – к.т.н., ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, yudin@gmail.com

Гюльнара Юсуповна Исаева – к.т.н., старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, gelia08@yandex.ru

Арсений Дмитриевич Мельник – старший лаборант, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, 14amelnikd@gmail.com

Мария Олеговна Бевзо – старший лаборант, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, bevozomo@gmail.com

Поступила в редакцию 20.09.2023

Hydrochemical and microbiological processes accompanying hybrid storage of hydrogen and methane in aquifers

L.A. Abukova*, E.A. Safarova, D.S. Filippova, V.E. Podnek, Yu.F. Kiyachenko, I.K. Yudin, G.Yu. Isaeva, A.D. Melnik, M.O. Bevzo

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: *abukova@ipng.ru

Abstract. Storage of hydrogen (methane–hydrogen mixtures) in geological formations has advantages in the potential injection volumes and cost parameters of production operations compared to its placement in ground-based artificial reservoirs. However, it involves a potential risk of undesirable hydrochemical and microbiological reactions leading to hydrogen loss, carbon dioxide production, geochemical transformations of reservoir rocks, corrosion of well equipment. The present article presents the results of the prediction of the aforementioned events for the underground storage of methane–hydrogen mixtures in aquifers containing highly mineralized reservoir water. Such an analysis is also important for assessing the effects of hybrid hydrogen and methane storage in salt caves.

Keywords: hydrogen, methane, underground gas storage facilities, methanogenesis, sulfate reduction, carbon dioxide corrosion

Citation: Abukova L.A., Safarova E.A., Filippova D.S., Podnek V.E., Kiyachenko Yu.F., Yudin I.K., Isaeva G.Yu., Melnik A.D., Bevzo M.O. Hydrochemical and microbiological processes accompanying hybrid storage of hydrogen and methane in aquifers // Actual Problems of Oil and Gas. 2023. Iss. 3(42). P. 221–234. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art14> (In Russ.).

References

1. *Muhammed N.S., Haq M.B., Al Shehri D.A.* et al. Hydrogen storage in depleted gas reservoirs: A comprehensive review // *Fuel*. 2023. Vol. 337. P. 127032. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127032>
2. *Zivar D., Kumar S., Foroozesh J.* Underground hydrogen storage: A comprehensive review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. P. 23436–23462. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.138>
3. *Mouli-Castillo J., Heinemann N., Edlmann K.* Mapping geological hydrogen storage capacity and regional heating demands: An applied UK case study // *Applied Energy*. 2021. Vol. 283. P. 116348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116348>
4. *Tarkowski R.* Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 105. P. 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.051>
5. *Abukova L.A., Abramova O.P.* Prediction of hydrogeochemical effects in clayey cap rocks during underground storage of hydrogen with methane // *Georesursy*. 2021. Vol. 23, No. 1. P. 118–126. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.1.13> (In Russ.).
6. *Filippova D.S.* Hydrogen in the geological environment: Features of generation and accumulation // *SOCAR Proceedings*. 2023. No. S2. P. 6–13. <https://doi.org/10.5510/OGP2023SI200885> (In Russ.).
7. *Markhinin E.K.* *Volcanism*. Moscow: Nedra, 1985. 288 p. (In Russ.).
8. *Pukha V.V., Nivin V.A., Mokrushina O.D.* Variations in molecular hydrogen concentrations in loose deposits of the Khibiny and Lovozero massifs and their exocontact zones // *Proceedings*

of the Fersman Scientific Session of GI KSC RAS. 2022. No. 19. P. 312–317. <https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.057> (In Russ.).

9. *Lein A.Yu., Bogdanov Yu.A., Sagalevich A.M.* et al. A new type of vent field in the Mid-Atlantic Ridge (Lost City vent field, 30°N) // *Doklady Earth Sciences*. 2004. Vol. 394, No. 1. P. 92–95.

10. *Sokolov V.A.* Geochemistry of gases of the Earth's crust and atmosphere. Moscow: Nedra, 1966. 301 p. (In Russ.).

11. *Hemme C., van Berk W.* Hydrogeochemical modeling to identify potential risks of underground hydrogen storage in depleted gas fields // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, No. 11. P. 2282. <https://doi.org/10.3390/app8112282>

12. Water in disperse systems / Ed. by B.V. Deryagin, N.V. Churaev, F.D. Ovcharenko. Moscow: Khimiya, 1989. 288 p. (In Russ.).

13. *Korolev V.A.* Bound water in rocks: New facts and problems // *Soros Educational Magazine*. 1996. Vol. 2, No. 9. P. 79–85. (In Russ.).

14. *Pichler M.P.* Assessment of hydrogen rock interaction during geological storage of CH₄-H₂ mixtures // Second EAGE Sustainable Earth Sciences (SES) Conference and Exhibition, Pau, France, 30 September – 4 October 2013. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131594>

15. *Kramarenko L.E.* Geochemical and prospecting value of groundwater microorganisms. Leningrad: Nedra, Leningrad Br., 1983. 181 p. (In Russ.).

16. *Rožanova E.P., Kuznetsov S.I.* Microbial flora of oil fields. Moscow: Nauka, 1974. 198 p. (In Russ.).

17. *Nazina T.N., Tourova T.P., Babich T.L.* et al. Diversity and possible activity of microorganisms in underground gas storage aquifers // *Microbiology*. 2021. Vol. 90, No. 5. P. 621–631. <https://doi.org/10.1134/S002626172105012X>

18. *Nazina T.N., Abukova L.A., Tourova T.P.* et al. Biodiversity and Potential Activity of Microorganisms in Underground Gas Storage Horizons // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 13. P. 9945. <https://doi.org/10.3390/su15139945>

19. *Ranchou-Peyruse M., Auguet J.-C., Mazière C.* et al. Geological gas-storage shapes deep life // *Environmental Microbiology*. 2019. Vol. 21, No. 10. P. 3953–3964. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14745>

20. *Cord-Ruwisch R., Kleinitz W., Widdel F.* Sulfate-reducing bacteria and their activities in oil production // *Journal of Petroleum Technology*. 1987. Vol. 39, No. 1. P. 97–106. <https://doi.org/10.2118/13554-PA>

21. *Truche L., Jodin-Caumon M.-C., Lerouge C.* et al. Sulphide mineral reactions in clay-rich rock induced by high hydrogen pressure. Application to disturbed or natural settings up to 250 °C and 30 bar // *Chemical Geology*. 2013. Vol. 351. P. 217–228. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.05.025>

22. *Abukova L.A., Dmitrievsky A.N., Volozh Yu.A., Antipov M.P.* Geofluid dynamic concept of prospecting for hydrocarbon accumulations in the Earth crust // *Geotectonics*. 2019. Vol. 53, No. 3. P. 372–382. <https://doi.org/10.1134/S0016852119030026>

23. *Goldhaber M.B., Orr W.L.* Kinetic controls on thermochemical sulfate reduction as a source of sedimentary H₂S // *ACS Symposium Series*. 1995. Vol. 612. P. 412–425. <https://doi.org/10.1021/bk-1995-0612.ch023>

24. Photocor. Particle size, zeta potential and molecular weight analyzers. <https://www.photocor.ru> (Accessed on 18.09.2023). (In Russ.).

Information about the authors

Leyla A. Abukova – Dr. Sci. (Geol.-Min.), Head of Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, abukova@ipng.ru

Elisaveta A. Safarova – Head of Center, Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, safarova@ipng.ru

Dina S. Filippova – Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, filippovads@ipng.ru

Vitaly E. Podnek – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory, Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, podnek77@gmail.com

Yuri F. Kiyachenko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, kiyachenko@mail.ru

Igor K. Yudin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, yudin@gmail.com

Gyulnara Yu. Isaeva – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, gelia08@yandex.ru

Arseniy D. Melnik – Senior Assistant, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 14amelnikd@gmail.com

Maria O. Bevzo – Senior Assistant, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, bevzomo@gmail.com

Received 20.09.2023