

Моделирование процессов закачки газа в подземные хранилища водорода путем воздействия акустическими колебаниями на водный раствор

Сафарова Е.А., Лесин В.И.

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия
safarova@ipng.ru

Аннотация

С целью создания методики моделирования воздействия гидростатического давления на изменения физико-химических свойств водных растворов, вызванных течением через пористое пространство, исследованы изменения: концентрации ионов водорода — Ph, величины окислительно-восстановительного (редокс) потенциала — Eh, размеров агрегатов коллоидных частиц как под действием колебаний давления акустического диапазона частот, так и под действием химического реагента — водорода.

Экспериментально установлено, что кратковременное акустическое воздействие на водный раствор (пластовая вода шчигровского горизонта Щелковского ПХГ) инициирует процессы снижения Eh и роста Ph, выпадение в твердую фазу частиц, содержащих оксиды железа и растворенные в воде соли; предельные значения Eh и Ph достигаются через несколько часов после прекращения воздействий в результате выпадения в осадок коллоидных частиц.

Проведенные исследования обосновывают использование высокочастотных колебаний давления для моделирования процессов, сопровождающих течение водных растворов в пористой среде под действием давления, создаваемого газом в процессах отбора и заполнения подземного хранилища.

Материалы и методы

В качестве источника УЗ колебаний с использовался УЗДН-А (22 кГц, 300 Вт), излучающий элемент которого, имеющий вид диска диаметром 1,5 см, погружался в водный раствор на глубину 1 см. Поверхность водного раствора была открыта для воздушной атмосферы, исходная температура растворов составляла 21 °С, при акустическом воздействии температура образца не повышалась более, чем на 2 °С.

Измерения pH и редокс-потенциала Eh производились с помощью многофункционального калиброванного тестера С-600 при температуре 21±23 °С. Измерения величин Eh и Ph

производились до начала и после обработки растворов УЗ колебаниями.

Изображения частиц, обнаруживаемых в пробах, полученные с помощью микроскопа (Olympus CX-41), обрабатывались системой оцифровки изображений. Для получения изображений частиц капли растворов одинакового объема помещали между покровными стеклами на предметный столик микроскопа.

Ключевые слова

подземное хранение газов, водный раствор, акустические колебания, редокс-потенциал, выпадение твердого осадка

Статья написана в рамках выполнения бюджетного задания № 125020501406-8 (FMME-2025-0011) по теме «Геологическое обоснование оптимальных условий природной и индуцированной внутрипластовой генерации водорода и его подземного хранения в истощенных месторождениях УВ и соляных структурах».

Для цитирования

Сафарова Е.А., Лесин В.И. Моделирование процессов закачки газа в подземные хранилища водорода путем воздействия акустическими колебаниями на водный раствор // Экспозиция Нефть Газ. 2025. № 2 С. 48–53. DOI: 10.24412/2076-6785-2025-2-48-53

Поступила в редакцию: 26.03.2025

GEOLOGY

UDC 621.6.028+662.767.2 | Original Paper

Modeling of gas injection processes into underground hydrogen storage facilities by exposing an aqueous solution to acoustic vibrations

Safarova E.A., Lesin V.I.

Oil and Gas Research Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
safarova@ipng.ru

Abstract

In order to create a method for modeling the effect of hydrostatic pressure on changes in the physicochemical properties of aqueous solutions caused by flow through a porous space, the following changes were studied: hydrogen ion concentration – Ph, oxidation-reduction (redox) potential – Eh, and the size of colloidal particle aggregates both under the influence of pressure fluctuations in the acoustic frequency range and under the influence of a chemical reagent – hydrogen.

It was experimentally established that short-term acoustic impact on an aqueous solution (formation water of the Shchigrov horizon of the Shchyolkovskoye UGS) initiates processes of decreasing Eh and increasing Ph, precipitation of particles containing iron oxides and salts dissolved in water into the solid phase; the limiting values of Eh and Ph are reached several hours after the cessation of impacts as a result of the precipitation of colloidal particles. The conducted studies substantiate the use of high-frequency pressure oscillations for modeling the processes accompanying the flow of aqueous solutions in a porous medium under the action of pressure created by gas in the processes of selection and filling of an underground storage facility.

Materials and methods

The source of ultrasonic vibrations was a UZDN-A (22 kHz, 300 W), the radiating element of which, in the form of a disk with a diameter of 1,5 cm, was immersed in an aqueous solution to a depth of 1 cm. The surface of the aqueous solution was open to the air atmosphere, the initial temperature of the solutions was 21 °C, under acoustic exposure, the temperature of the sample did not increase by more than 2 °C.

pH and redox potential Eh were measured using a multifunctional calibrated tester C-600 at a temperature of 21 ± 23 °C. The Eh and Ph

values were measured before and after treating the solutions with ultrasonic vibrations.

Images of particles detected in samples obtained using a microscope (Olympus CX-41) were processed by an image digitization system. To obtain images of particles, drops of solutions of the same volume were placed between cover glasses on the microscope stage.

Keywords

underground gas storage, aqueous solution, acoustic vibrations, redox potential, precipitation of solid sediment

For citation

Safarova E.A., Lesin V.I. Modeling of gas injection processes into underground hydrogen storage facilities by exposing an aqueous solution to acoustic vibrations. Exposition Oil Gas, 2025, issue 2, P. 48–53. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2025-2-48-53

Поступила в редакцию: 26.03.2025

Введение

В настоящее время на модельных объектах исследуются физико-химические явления, которые могут сопровождать процессы, связанные с подземным хранением как водорода, так и смеси водорода с метаном и углекислым газом. Для прямого моделирования процессов закачки газа необходимо использование взрывоопасных лабораторных установок, работающих при давлениях в диапазоне нескольких десятков единиц МПа, что требует специальной аппаратуры и особых условий ее размещения для проведения экспериментов.

Известно, что течение коллоидных растворов, включая водные растворы и нефть, через капилляры и пористые среды сопровождается возникновением в жидкости электрического поля E и, как следствие, «потенциала течения» — разности потенциалов ΔU ($E = \Delta U / \Delta x$), которые пропорциональны градиенту давления $P - \Delta P / \Delta x$ [1]:

$$E = \Delta U / \Delta x = k \times (\Delta P / \Delta x) \quad (1),$$

где $k = \text{const}$, E — средняя напряженность электрического поля в интервале Δx .

В случае, когда жидкий раствор в капилляре подвергается акустическому воздействию, создаваемому колебаниями давления P с частотой $\omega - P = P \sin(\omega t - kx)$, уравнение (1) приобретает вид [2]:

$$E(\omega) = (\Delta U / \Delta x)(\omega) = K \cdot (\Delta P / \Delta x)(\omega), \quad \text{или } \Delta U = K \Delta P \quad (2),$$

где ω — частота вибрационных колебаний, x — расстояние от источника давления, k — волновое число, $K = \varepsilon \varepsilon_0 \zeta / \eta \sigma \varepsilon$ — диэлектрическая проницаемость воды, ε_0 — вакуумная постоянная, ζ — дзета потенциал коллоидной частицы, η — вязкость, σ — проводимость раствора. Типичные значения K для течения в горных породах лежат в диапазоне $10 \div 50$ мВ/МПа [3].

Из (1) и (2) следует, что в коллоидном растворе, поскольку $\text{div} E \sim \rho$ (где ρ плотность электрического заряда), как под действием постоянного градиента давления, так и под действием колебаний давления, возникают объемы жидкости, обладающие ненулевыми зарядами, в которых возникают условия протекания химических реакций невозможных в электрически нейтральной среде при низкой температуре. За счет появления объемных зарядов возникают объемные силы E_r , создающие локальный градиент давления, изменяющий скорость движения жидкости.

Такие электрические поля возникают в результате смещений диффузного слоя ионов относительно заряженной коллоидной частицы и/или агрегата коллоидных частиц [4].

Агрегаты коллоидных частиц обладают фрактальным строением, содержат в своем составе коллоидные частицы и растворенные в водных прослойках между частицами ионы. Агрегаты формируются уже при объемной концентрации 10^{-5} % весовых, разрушаются на фрагменты как под действием течения жидкости, так и под действием внешних электромагнитных полей [5–7].

Течение коллоидных растворов воды и нефти, как в пористом пространстве, так и в трубопроводах, сопровождается возникновением электрических полей и волн плотности электрических зарядов, представляющих движущиеся электрически заряженные объемы жидкости [7, 8]. За счет взаимного притяжения электрических зарядов повышается локальное гидростатическое давление, возникают градиенты давления, направленные против течения, которые компенсируются силами Стокса, вызываемыми обтеканием вязкой жидкостью коллоидных частиц. Изменения электрического потенциала, вызванные течением через пористую среду уже при градиентах давления порядка $0,3$ атм/м водяного столба, могут достигать величин порядка $0,1B - 1B$ [7].

В работе [9] на основе анализа экспериментальных результатов был сделан вывод о том, что: «циклическая смена термобарических воздействий приводит к изменению окислительно-восстановительных условий в системе «порода — поровые воды» и сопровождается повышением реакционной способности кальция, магния, серы, железа». Многократный циклический рост и падение давления на образцах глин и аргиллитов сопровождались в поровых водах ростом Ph на $1 \div 2$ единицы, минерализации, концентрации органического углерода, концентрации Fe^{2+} , а также снижением концентрации Fe^{3+} в минералах.

Проведенные в [10] исследования обосновали «использование электрических полей для моделирования процессов, сопровождающих эксплуатацию подземных хранилищ, расположенных в водоносных пластах»; электрическое воздействие привело к снижению Eh и росту Ph, выпадению в осадок растворенных веществ из водного раствора.

Использование электродов для создания электрических полей может сопровождаться их растворением, что может вносить

определенный вклад в изменение физико-химических характеристик объекта, поэтому целью данного исследования стала замена прямого электрического воздействия на косвенное, возникающее при акустических колебаниях давления (вибровоздействии) на водный раствор, поскольку такого типа воздействия широко применяются в качестве технических средств для очистки поровых каналов горной породы от твердых механических примесей [2].

В [11] авторы показали, что снижение Eh и рост Ph после перемешивания водных растворов вызваны диссоциацией «микродисперсной фазы» и ее повторным образованием через несколько часов после прекращения перемешивания.

На основании результатов, полученных в [4, 7, 10, 11], в данной работе в качестве физико-химических характеристик водных растворов были приняты: водородный показатель — Ph, окислительно-восстановительный (редокс) потенциал — Eh, размеры и концентрация механических примесей.

Экспериментальная часть

В качестве объектов акустического воздействия ультразвуковой частоты (УЗ колебаниями) была использована пластовая вода, отобранная из скважины Щелковского подземного хранилища метана. В водном растворе содержались примеси около 40 низкомолекулярных органических соединений (спирты, алкены, кетоны кислоты в концентрациях порядка долей и нескольких единиц микрограммов). Общая минерализация (сухой остаток) в воде составляла 135 г/л, концентрация H_2CO_3 составляла 59 мг/л, концентрация $NaCl$ — 131 г/л в пересчете на Cl^- , SO_4 — 1585 мг/л, K — 802 мг/л, Ca — $6\ 932$ мг/дм³, железо общее Fe — $19,9$ мг/л. Помимо вышеперечисленных в качестве примесей в воде присутствовали другие минеральные соли и растворенные органические вещества, составляя в сумме не более 135 г/л сухих веществ в качестве примесей (состав водного раствора приведен в [10]).

После извлечения из скважины водный раствор хранился в открытой для наземной атмосферы емкости, в которой примерно за 8 часов хранения выделились коллоидные частицы трехвалентного железа красно-коричневого цвета, что свидетельствовало о том, что в исходном растворе железо присутствовало в восстановленной двухвалентной форме растворенных в воде соединений. Находясь в контакте с атмосферным воздухом,

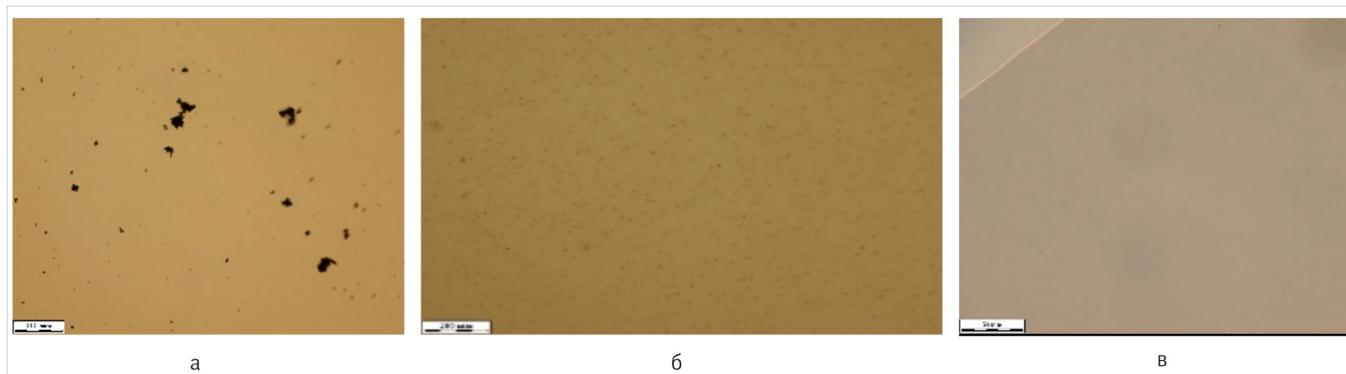


Рис. 1. Микрофотографии (шкала 200 мкм) частиц водного раствора: а — до вибровоздействия; б — после вибровоздействия; в — после осаждения

Fig. 1. Micrographs (scale 200 μm) of particles of an aqueous solution: а — before vibration exposure; б — after vibration exposure; в — after sedimentation

в котором присутствуют окислители в виде O_2 и CO_2 , двухвалентное железо окисляется до трехвалентного, что сопровождается формированием коллоидных частиц, представляющих нерастворимые в воде оксиды железа с примесями органических веществ. Такие коллоидные частицы, обладающие электрическими зарядами, образуют состоящие из сотен тысяч частиц коллективные структуры фрактального строения — фрактальные агрегаты — ФА [5, 7], которые захватывают из раствора ионы для снижения сил отталкивания между электрически заряженными коллоидными частицами.

На рисунке 1 показаны изображения частиц в водном растворе до и после проведения процедуры УЗ обработки.

Исходный раствор был подвергнут обработке вибровоздействием в течение 20 мин. при температуре 21 °С. На рисунке 1 показаны микрофотографии частиц, находившихся в растворе до вибровоздействия (рис. 1а) и после вибровоздействия (рис. 1б).

Сравнение фотоизображений показывает, что после обработки вибро-

воздействием произошло разрушение ФА: исчезли ФА с размерами более 1 мкм, что вызвало рост Ph и снижение Eh. До вибровоздействия количество ФА n в единице объема составляло $n = 160 \pm 12$, $\text{Ph} = 4,97$, $\text{Eh} = 225$ мВ; после обработки — $n = 60 \pm 8$, $\text{Ph} = 5,7$, $\text{Eh} = 157$ мВ. Через 24 часа количество ФА возросло до $n = 195 \pm 14$, $\text{Ph} = 6,16$, $\text{Eh} = 214$ мВ. Через 50 часов стало $\text{Eh} = 160$ мВ, $\text{Ph} = 6,3$, произошло осаждение коллоидных частиц размерами более 1 мкм, что демонстрирует микрофотография (рис. 1в), на которой не было зарегистрировано частиц с размерами более 1 мкм.

Для моделирования воздействия водорода через водный раствор продувался водород, после чего на него осуществляли акустическое воздействие.

После продувки водородом было зарегистрировано снижение Eh с $\text{Eh} = 200$ мВ до $\text{Eh} = 28$ мВ. Кратковременное акустическое воздействие на раствор сопровождалось процессом снижения Eh и ростом Ph во времени (рис. 2, 3).

На рисунках 4а и 4б показаны микрофотографии капель этого раствора, полученных до и после процедуры акустического воздействия. Фотографии показывают, что коллективные структуры, образованные коллоидными частицами, разрушились после акустического воздействия в течение 4,5 мин.

Исходная величина Eh раствора составляла +28 мВ, что находится в интервале значений $0 \div 100$ мВ, соответствующем окислительно-восстановительным свойствам. Акустическое воздействие оказывалось в течение 1,5 мин. и прекращалось после достижения раствором температуры 23 °С, после чего производилось измерение параметров раствора. После достижения $\text{Eh} = -19$ мВ акустическое воздействие было прекращено, образец находился в покое, наблюдался процесс осаждения взвешенных в растворе частиц, производились измерения Eh и Ph. На рисунках 2 и 3 показаны данные измерений Eh и Ph, полученные в ходе эксперимента.

Из графиков видно, что после прекращения акустического воздействия снижение Eh и рост Ph, вызванные колебаниями давления, продолжились во времени. Через 24 часа раствор приобрел значительный восстановительный потенциал $\text{Eh} = -162$ мВ (рис. 2), величина Ph раствора выросла с $\text{Ph} = 5,7$ до $\text{Ph} = 6,35$, что соответствует снижению концентрации в водном растворе ионов H^+ , обладающих окислительными свойствами, и росту концентрации ионов OH^- , обладающих восстановительными свойствами. При дальнейшем наблюдении было обнаружено, что за счет окисления водного раствора в результате диффузии O_2 и CO_2 при продолжении хранения образца в контакте с воздухом Eh возрос до $\text{Eh} = -144$ мВ.

После ультразвукового воздействия средние размеры частиц, имевшие характерную для фрактальных агрегатов форму, уменьшились в размерах с $50 \div 60$ мкм до $5 \div 10$ мкм. Ультразвуковое воздействие при температуре 22 °С сопровождалось снижением Eh с 28 мВ до $\text{Eh} = -4$ мВ и ростом Ph. После прекращения воздействия падение Eh продолжалось и достигло предельного значения -160 мВ за 20 час.

При измерении Eh и Ph в ходе эксперимента отмечался слабый дрейф сигналов Eh и Ph, что свидетельствовало о присутствии электрически заряженных коллоидных частиц, обладающих низким коэффициентом диффузии, вследствие чего первичное значение сигнала изменялось за счет процесса движения частиц к детектору.

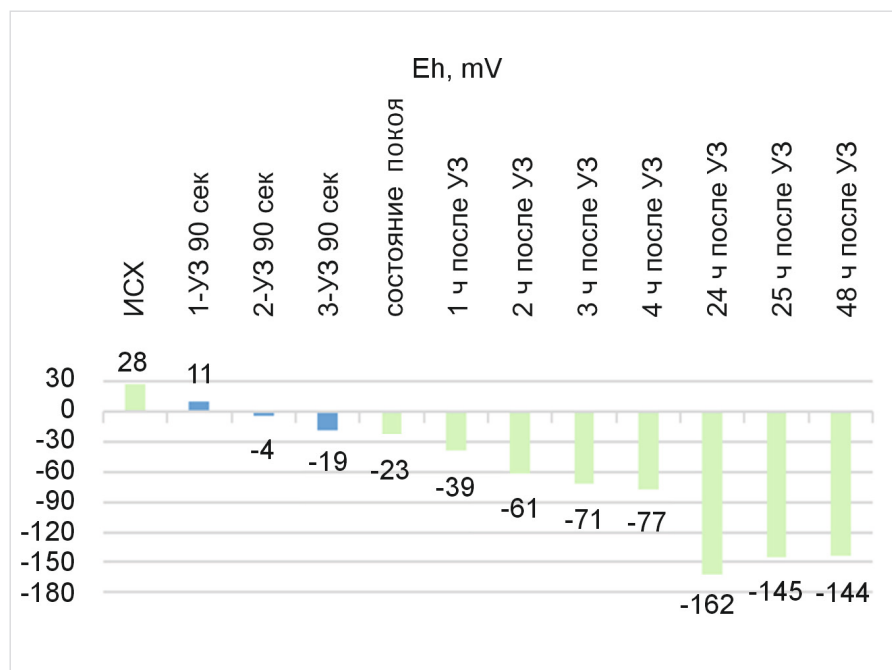


Рис. 2. График изменений Eh в ходе эксперимента по воздействию УЗ колебаниями на водный раствор

Fig. 2. Graph of changes in Eh during an experiment on the effect of ultrasonic vibrations on an aqueous solution

Итоги

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о том, что изменения физико-химических параметров водного раствора являются следствием воздействия на коллоидную составляющую, присутствующую как в виде агрегатов коллоидных частиц фрактального строения — ФА, так и в виде отдельных коллоидных частиц. ФА представляют агрегаты электрически положительно заряженных коллоидных частиц оксидов трехвалентного железа с примесями других соединений и, вероятно, коллоидных частиц, не содержащих железа.

Агрегаты могут быть разрушены силами напряжений сдвига, вызываемыми течением жидкости под действием градиента скорости, вызванным как переменным, так и стационарным давлением. Напряжение сдвига, возникающее при акустических колебаниях, вызывает разрушение агрегата на фрагменты, представляющие как отдельные коллоидные частицы, так небольшие группы коллоидных частиц [7], что сопровождается появлением в растворе захваченных ФА ионов, в том числе OH^- , понижающих величину Eh и повышающих величину Ph.

Отметим, что разрушение агрегатов сопровождается изменением во времени проводимости σ , дзета потенциала ζ , поэтому и константа K в формуле (2) также будет зависеть от времени в случае, когда в растворе присутствуют агрегаты коллоидных частиц.

Разрушение агрегатов возможно как за счет изменения заряда, так и за счет изменения химического состава коллоидных частиц под действием активных реагентов, к которым относится водород. В [12] было экспериментально показано, что коллоидные частицы оксида железа Fe_2O_3 в присутствии газов водорода H_2 в водном растворе образуют частицы магнетита коричневого цвета Fe_3O_4 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 \leftrightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$), который выпадает в осадок совместно с другими соединениями, содержащимися в растворе, что и наблюдалось в приведенном в данной статье эксперименте.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что как вибрационное воздействие, так присутствие водорода

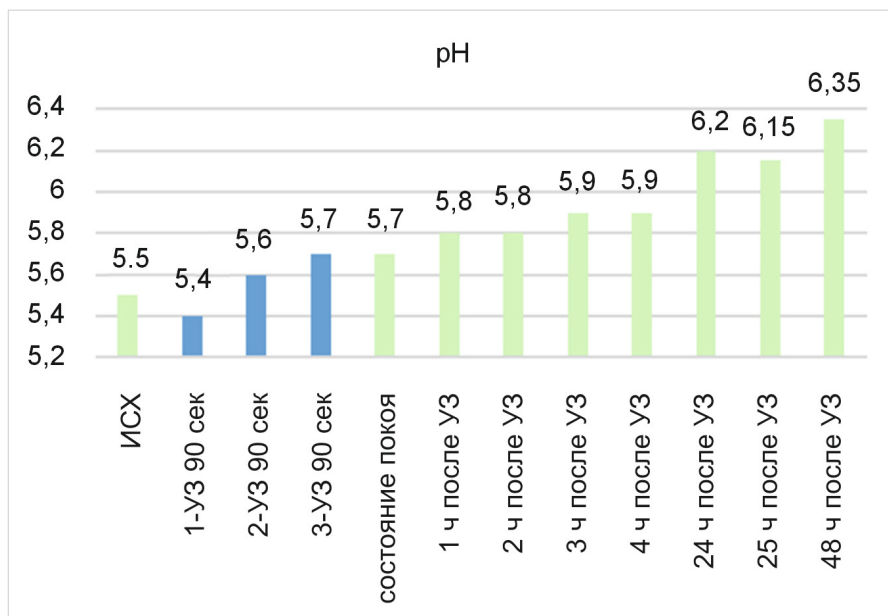


Рис. 3. График изменений Ph в ходе эксперимента по воздействию УЗ колебаниями на водный раствор

Fig. 3. Graph of changes in Ph during an experiment on ultrasonic vibrations on an aqueous solution

в растворе вызывают рост Ph (снижение концентрации H^+), что соответствует росту величины Ph, наблюдавшемуся в [9] при циклическом повышении давления в диапазоне нескольких десятков МПа, приводящего к вытеснению водных растворов из порового пространства. Вытеснение — течение водных растворов в поровом пространстве вызвало растворение Fe^{3+} и появление в растворе восстановленной формы железа Fe^{2+} , что сопровождалось ростом Ph [9].

Характерные времена изменений Eh и Ph, полученные в работе, соответствуют скоростям процессов разрушения-формирования коллективных структур коллоидных частиц — агрегатов фрактального строения [5, 6], в том числе в аналогичных по составу водных растворах, содержащих примеси коллоидных частиц железа. Такие агрегаты присутствовали в исследованных растворах и разрушались

на мелкие фрагменты в результате акустического воздействия. Как видно из рисунка 1, акустическое воздействие разрушает агрегаты коллоидных частиц, увеличивая поверхность контакта жидкость — коллоидная частица. Такое воздействие сопровождается повышением концентрации ионов, захваченных агрегатами [7], что проявляется в изменениях Eh и Ph.

В обзоре [13] отмечено сходство результатов электрохимической и УЗ деструкции растворенных в воде органических веществ. Это связано с тем, что как при УЗ воздействии в присутствии частиц соединений железа, так и при электровоздействии с использованием железных электродов в водном растворе возникают объемные электрические заряды и происходят электрохимические процессы, приводящие к образованию перекиси водорода и активным формам кислорода,

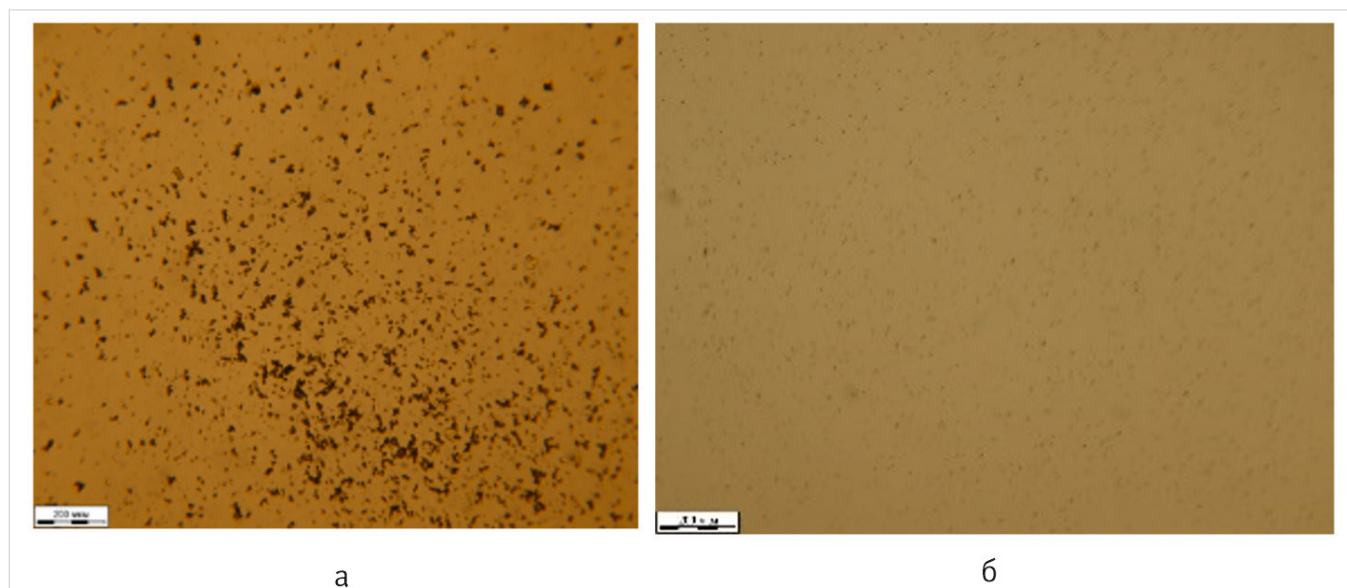


Рис. 4. Фотография образца водного раствора: а — УЗ воздействия (шкала 200 мкм); б — после УЗ воздействия (шкала 50 мкм)
Fig. 4. Photograph of a sample of an aqueous solution: a — ultrasound exposure (scale 200 μm); b — after ultrasound exposure (scale 50 μm)

вызывающим деструкцию органического вещества до H_2O и CO_2 , что сопровождается осаждением $Fe(OH)_3$ совместно с захваченными окислителями-радикалами.

Выводы

В работе показано, что как кратковременное воздействие акустическими колебаниями, так и введение в раствор газа восстановителя — водорода сопровождаются сходными изменениями физико-химических свойств водного раствора, что является следствием разрушения-формирования-выпадения в осадок дисперсной фазы раствора. Это позволяет производить предварительную оценку рисков потерь водорода в процессе эксплуатации подземных водоносных геологических структур, используя любое из вышеперечисленных воздействий.

Окисление железа до трехвалентного состояния после контакта с атмосферным воздухом показывает, что водный раствор в подземном хранилище метана обладает восстановительными свойствами, вследствие чего в водном растворе железо присутствует в форме Fe^{2+} .

Литература

1. Комаров В.А. Геоэлектрохимия. СПб.: Санкт-Петербургский университет, 1994. 136 с.
2. Шафарец Б.П. Реализация приемной антенны на механизме электрокинетического явления «потенциал течения» // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 2.

3. Барабанов В.Л. Прикладная механика электрокинетических явлений проницаемых пористых песчаников по данным лабораторных экспериментов // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 1. 24 с.
4. Лесин В.И. Волны плотности электрических зарядов при течении жидких коллоидных растворов // Нефтяное хозяйство. 2005. № 4. С. 124–126.
5. Sonntag R.C., Russel W.B. Structure and breakup of flocs subjected to fluid stresses: I. Shear experiments. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1986, Vol. 113, issue 2, P. 399–413. (In Eng).
6. Ролдугин В.И. Свойства фрактальных дисперсных систем // Успехи химии. 2003. Т. 72. № 11. С. 102–105.
7. Лесин В.И. Роль коллоидных частиц в воздействии электромагнитных полей и напряжений сдвига на вязкость и фильтрацию нефти и воды // Технологии нефти и газа. 2024. № 1. С. 34–39.
8. Газимов М.Г., Максудов Р.А., Кадеев К.М. Электрризация при освоении и эксплуатации скважин. Казань: Татарское книжное издательство, 1972. 80 с.
9. 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.

10. Сафарова Е.А., Лесин В.И. Применение метода электровоздействия на водные растворы как способ моделирования процессов, сопровождающих подземное хранение водорода // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2024. № 12. С. 65–69.
11. Яхно Т.А., Яхно В.Г. Исследование роли микродисперсной фазы воды при переходе ее в состояние активации // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2020. Т. 5. № 1. С. 43–51.
12. Pathak A., Bowman S., Sharma S. Modeling impacts of Fe activity and H_2 partial pressure on hydrogen storage in shallow subsurface reservoirs. *Aquatic Geochemistry*, 2024, Vol. 30, P. 73–92. (In Eng).
13. Харламова Т.А., Колесников А.В., Алафердов А.Ф., Сарбаева М.Т., Гайдукова А.М. Перспективные электрохимические процессы в технологиях обезвреживания сточных вод. II. Электрохимическая деструкция органических веществ; использование электролиза в технологии очистки воды // Гальванотехника и обработка поверхности. 2013. Т. 21. № 3. С. 55–62.

ENGLISH

Results

The obtained experimental results allow us to conclude that changes in the physicochemical parameters of an aqueous solution are a consequence of the impact on the colloidal component, present both in the form of aggregates of colloidal particles of fractal structure – FA, and in the form of individual colloidal particles. FA are aggregates of electrically positively charged colloidal particles of trivalent iron oxides with impurities of other compounds and, probably, colloidal particles that do not contain iron.

Aggregates can be destroyed by shear stress forces caused by the flow of liquid under the action of a velocity gradient caused by both variable and stationary pressure. Shear stress arising from acoustic vibrations causes the destruction of the aggregate into fragments representing both individual colloidal particles and small groups of colloidal particles [7], which is accompanied by the appearance of ions captured by FA in the solution, including OH^- , which reduce the value of Eh and increase the value of Ph. Note that the destruction of aggregates is accompanied by a change in conductivity σ , zeta potential ζ over time, therefore the constant K in formula (2) will also depend on time in the case where aggregates of colloidal particles are present in the solution.

The destruction of aggregates is possible both due to a change in charge and due to a change in the chemical composition of colloidal particles under the action of active reagents, which include hydrogen. In [12], it was experimentally shown that colloidal particles of iron oxide Fe_2O_3 in the presence of hydrogen gases H_2 in an aqueous solution form brown magnetite particles $-Fe_3O_4$ ($Fe_2O_3 + H_2 \leftrightarrow 2Fe_3O_4 + H_2O$), which precipitates together with other compounds contained in the solution, which was observed in the experiment presented in this article. The obtained experimental results show that both the vibration effect and the presence of hydrogen in the solution cause an increase in Ph (a decrease in the concentration of H^+), which corresponds to the increase in the Ph value observed in [9] with a cyclic increase in pressure in the range of several tens of MPa, leading to the displacement of aqueous solutions from the pore space. The displacement – flow of aqueous solutions in the pore space caused the dissolution of Fe^{3+} and the

appearance of the reduced form of iron Fe^{2+} in the solution, which was accompanied by an increase in Ph [9]. The characteristic times of Eh and Ph changes obtained in the work correspond to the rates of the processes of destruction-formation of collective structures of colloidal particles - aggregates of a fractal structure [5, 6], including in aqueous solutions of similar composition containing impurities of colloidal iron particles. Such aggregates were present in the studied solutions and were destroyed into small fragments as a result of acoustic action. As can be seen from fig. 1, acoustic action destroys aggregates of colloidal particles, increasing the contact surface of the liquid – colloidal particle. This effect is accompanied by an increase in the concentration of ions captured by aggregates [7], which is manifested in changes in Eh and Ph.

The review [13] noted the similarity of the results of electrochemical and ultrasonic destruction of organic substances dissolved in water. This is due to the fact that both with ultrasonic exposure in the presence of particles of iron compounds and with electrical exposure using iron electrodes, volumetric electric charges arise in the aqueous solution and electrochemical processes occur, leading to the formation of hydrogen peroxide and active forms of oxygen, causing the destruction of organic matter to H_2O and CO_2 , which is accompanied by the precipitation of $Fe(OH)_3$ together with captured oxidizing radicals.

Conclusions

The work shows that both short-term exposure to acoustic vibrations and the introduction of a reducing gas, hydrogen, into the solution are accompanied by similar changes in the physicochemical properties of the aqueous solution, which is a consequence of the destruction-formation-precipitation of the dispersed phase of the solution. This allows for a preliminary assessment of the risks of hydrogen losses during the operation of underground aquifers using any of the above effects.

Oxidation of iron to the trivalent state after contact with atmospheric air shows that the aqueous solution in the underground methane storage facility has reducing properties, as a result of which iron is present in the aqueous solution in the form of Fe^{2+} .

References

1. Komarov V.A. Geoelectrochemistry. St. Petersburg: St. Petersburg University, 1994, 136 p. (In Russ).
2. Shafarets B.P. Implementation of a receiving antenna using mechanism of electrokinetic phenomenon "flow potential". Nauchnoe pribostroyeniye, 2019, Vol. 29, issue 2, P. 103–108. (In Russ).
3. Barabanov V.L. Applied mechanics of electrokinetic phenomena in porous permeable sandstones by flow-laboratory tests. Actual problems of oil and gas, 2018, issue 1, 24 p. (In Russ).
4. Lesin V.I. Waves of electric charge density during the flow of liquid colloidal solutions. Oil Industry, 2005, issue 4, P. 124–126. (In Russ).
5. Sonntag R.C., Russel W.B. Structure and breakup of flocs subjected to fluid stresses: I. Shear experiments. Journal of Colloid and Interface Science, 1986, Vol. 113, issue 2, P. 399–413. (In Eng).
6. Roldugin V.I. The characteristics of fractal disperse systems. Uspekhi khimii, 2003, Vol. 72, issue 11, P. 102–105. (In Russ).
7. Lesin V.I. The role of colloidal particles in the effect of electromagnetic fields and shear stresses on the viscosity and filtration of oil and water. Tekhnologii nefti i gaza, 2024, issue 1, P. 34–39. (In Russ).
8. Gazimov M.G., Maksutov R.A., Kadeev K.M. Electrification during well development and operation. Kazan: Tatar book publishing house, 1972, 80 p. (In Russ).
9. Abukova L.A., Abramova O.P. Prediction of hydrogeochemical effects in clayey cap rocks during underground storage of hydrogen with methane. Georesources, 2021, Vol. 23, issue 1, P. 118–126. (In Russ).
10. Safarova E.A., Lesin V.I. Application of the method of electrical action on aqueous solutions as a method for modeling the processes accompanying underground storage of hydrogen. Geology, geophysics and development of oil and gas fields, 2024, issue 12, P. 65–69. (In Russ).
11. Yakhno T.A., Yakhno V.G. Study of the role of the microdispersed phase of water in its transition to the activation state. Actual issues of biological physics and chemistry, 2020, Vol. 5, issue 1, P. 43–51. (In Russ).
12. Pathak A., Bowman S., Sharma S. Modeling impacts of Fe activity and H₂ partial pressure on hydrogen storage in shallow subsurface reservoirs. Aquatic geochemistry, 2024, Vol. 30, P. 73–92. (In Eng).
13. Kharlamova T.A., Kolesnikov A.V., Alaferdov A.F., Sarbaeva M.T., Gaidukova A.M. Promising electrochemical processes in wastewater treatment technologies. II. Electrochemical destruction of organic substances; use of electrolysis in water purification technology. Galvanotechnics and surface treatment, 2013, Vol. 21, issue 3, P. 55–62. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сафарова Елисавета Александровна, научный сотрудник, зав. Центром обеспечения научно-образовательного процесса, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия
Для контактов: safarova@ipng.ru

Лесин Виктор Иванович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

Safarova Elisaveta Alexandrovna, researcher, head of the Center for providing scientific and educational process, Oil and gas research institute RAS, Moscow, Russia
Corresponding author: safarova@ipng.ru

Lesin Victor Ivanovich, ph.d. of physico-mathematical sciences, leading researcher, Oil and gas research institute RAS, Moscow, Russia



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ 19–23 МАЯ 2025, г. Адлер

«Бурение, освоение, испытания, ремонт и эксплуатация горизонтальных, многоствольных, разветвленных скважин. Инновации в области добычи нефти и газа. Промышленная безопасность на ОПО нефтегазовой отрасли»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ 02–06 ИЮНЯ 2025, г. Калининград

«Инновационные решения в области КРС, ПНП, ГНКТ, внутрискважинные работы и супервайзинг в горизонтальных и разветвленных скважинах. Контроль скважин. Управление скважиной при ГНВП. Противофонтанная безопасность»

+7 3452 520-958

бронирование участия в конференциях
academy.intechnol.com

Генеральный информационный партнер

**ЭКСПОЗИЦИЯ
НЕФТЬ ГАЗ**