

2) предоставлять информацию о качестве проведенных работ в государственные надзорные органы;

3) в рамках, установленных договором компетенций, осуществлять контроль за соблюдением подрядчиком технологий строительства водозаборной скважины, проведением рабочего испытания, материалов используемых при строительстве, техники безопасности, охраны и санитарии труда, охраны окружающей среды;

4) контролировать проведение на объектах строительства водозаборной скважины всех ответственных операций, соблюдения подрядчиком качества и порядка выполнения работ, санитарно-эпидемиологической безопасности;

5) принимать оперативные решения на месте работ в случае возможного возникновения технологических проблем бурения, геологических осложнений бурового разреза, возможных аварий, в том числе влияющих на отклонение от санитарных норм, требующих немедленного разрешения;

6) осуществлять первичную приемку работ, выполненных подрядчиком, и передавать информацию в органы, лицензирующие данный вид деятельности.

При сооружении водозаборных скважин наиболее приемлемыми кандидатурами специалистов, осуществляющих супервайзинг, будут являться кадры, прошедшие обучение по образовательным направле-

ниям и профилям «Гидрогеология и инженерная геология» и «Природообустройство и водопользование». Специалисты-гидрогеологи могут определить геологическую природу факторов, влияющих на дебит водозаборной скважины, и дать рекомендации по возможным действиям для уменьшения влияния негативных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башкатов Д.Н. Современные тенденции развития техники и технологий сооружения скважин на воду // Недропользование XXI век. — 2009. — № 6. — С. 52–55.
2. Беляев С.Л., Боярко Г.Ю., Сизов А.В. Организация системы противотальсификационного входного контроля материалов на нефтегазостроительном предприятии // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. — 2014. — № 3. — С. 20–24.
3. Коломиец А.М. О необходимости разработки и реализации методических и технологических требований к сооружению, освоению и ликвидации скважин на воду // Недропользование XXI век. — 2007. — № 4. — С. 11.
4. САНПИН 2.1.4.1175-02. Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников // Российская газета. — № 244. — 28. 12. 2002 г.
5. Свод правил СП 31.13330.2012. СНиП 2.04.02-84 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения (утв. приказом Министерства регионального развития РФ от 29 декабря 2011 г. N 635/14). — М.: издание Минрегиона России, 2011.

© Сизов А.В., Боярко Г.Ю., 2015

Сизов Алексей Валентинович // sizov_aleksey@rambler.ru
Боярко Григорий Юрьевич // gub@tpu.ru

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 624.131

Шигорина Е.Г., Строкова Л.А. (Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИКРОБНОГО ОСАЖДЕНИЯ КАЛЬЦИТА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГРУНТОВ

*Микробно-индуцированное осаждение кальцита (МИСР) — процесс цементирования с участием микроорганизмов, который улучшает геотехнические свойства горных пород. Представлена численная модель микробного осаждения кальцита для снижения проницаемости массива трещиноватых горных пород и предотвращения утечек из резервуаров для хранения CO₂. Результаты показывают, что проницаемость трещиноватых пород в радиусе 5 м от места инъекции может снизиться в 3 раза. **Ключевые слова:** мелиорация грунтов, химические свойства, осаждение кальцита, биоцементация.*

Shigorina E.G., Strokova L.A. (National Research Tomsk Polytechnic University)

NUMERICAL INVESTIGATION OF MICROBIALY INDUCED CALCITE PRECIPITATION AND ITS INFLUENCE ON THE PERMEABILITY OF SOIL

Abstract Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP), a bio-mediated cementation process that improves the geotechnical properties of soils. The current study presents a numerical

*model for microbially induced calcite precipitation predicting the reduction of permeability over time due to biomineralization in fracture of rocks and prevention of a leakage from CO₂ storage reservoirs. The results shows the permeability of the fracture-layer can decrease by the factor of 3 in a radius of 5 meters from injection position **Key words:** soil improvement, chemical properties, calcite precipitation, biocementation.*

Интерес к технологиям использования биологических процессов в геотехнической практике резко возрос в последнее десятилетие [9]. Первый международный семинар по биогеотехнологии в 2007 г. способствовал междисциплинарному обсуждению и определению приоритетов научно-исследовательских тем в этой новой области [2]. Исследовательские программы по биогеотехнологии действуют более чем в 15 странах мира, выполнены серьезные исследования [4–10]. Второй международный семинар по биогеотехнологии был проведен в 2011 г. в университете Кембриджа. Семинар собрал 35 ведущих исследователей в этой области и предоставил возможность оценить полученные результаты, наметить основные проблемы и пути их решения. Одной из перспективных биогеотехнологий является микробное осаждение кальцита (*microbially induced calcite precipitation* — МИСР). Эта технология используется при производстве кирпичей, создании непроницаемых барьеров, пленок для предотвращения утечек воды или загрязнителей из хранилищ, цементирования

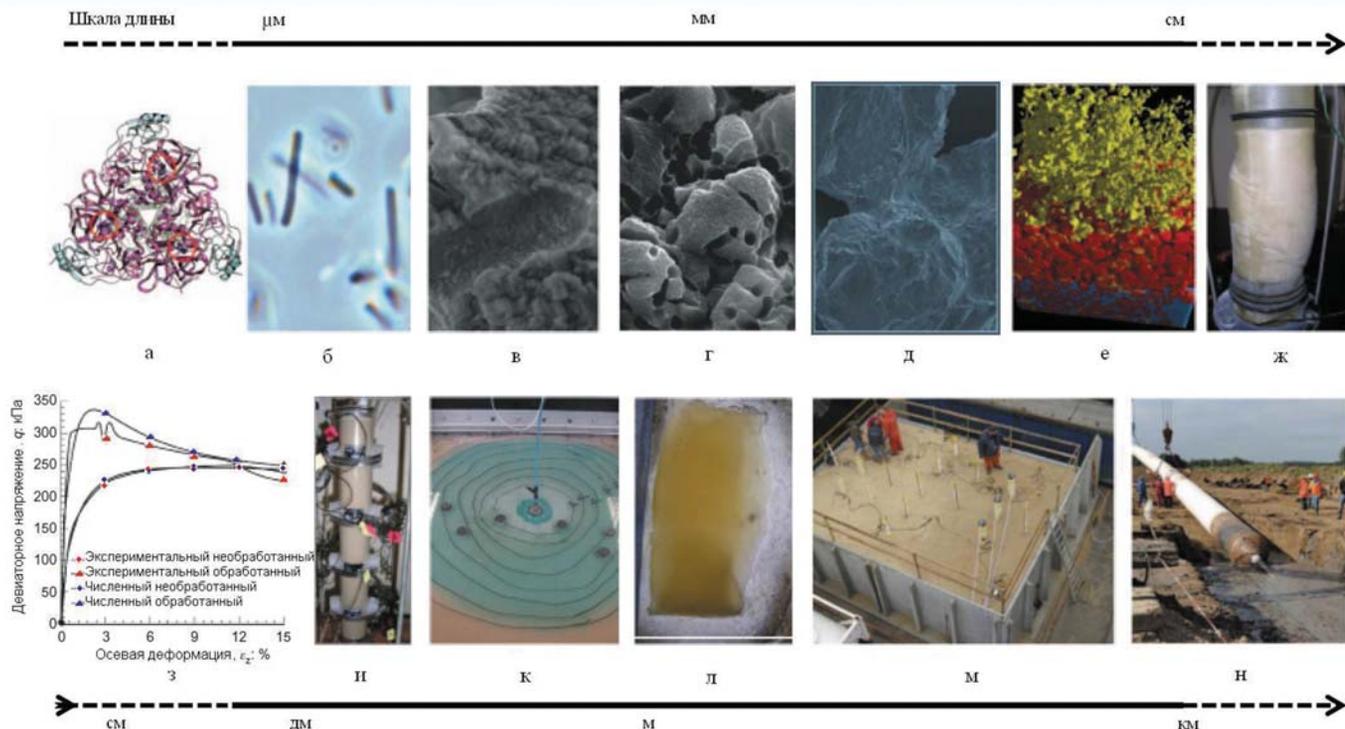


Рис. 1. Представление масштабов изучения MICP [2]: а — структура фермента уреазы в пределах микробов; б — микробы *Sporosarcina pasteurii*; в — следы бактерий внутри осажденного кальцита; г — структура осажденного кальцита; д — зерна MICP-цементированного песка; е — данные компьютерной томографии MICP-цементированного песка; ж — трехосные испытания MICP-цементированного образца; з — моделирование трехосного испытания на сжатие MICP-образца; и — испытание образца методом резонансной колонки; к — исследование радиального потока; л — непроницаемый кожух MICP для водохранилища местного стока; м — MICP-обработка 100 м³ песка; н — полевые испытания

песка, в частности, с целью обеспечить повышенную безопасность для зданий, расположенных в сейсмически активных районах, в прибрежных зонах.

В настоящее время существуют две разновидности этой технологии: биоаугментация (где микробы вводятся в грунты) и биостимуляция (где стимулируются природные микробы). Биоаугментация считается менее благоприятной для окружающей среды, чем биостимуляция, из-за введения экзогенных (non-native) микробов; кроме того для проведения работ по технологии биоаугментации в некоторых случаях необходимо получение разрешений соответствующих контролирующих органов, она требует значительных расходов и сложна в практическом использовании. Предпочтение отдается биостимуляции, так как в процессе ее стимулируется рост микробов, которые адаптированы для этой среды, и возникает значительно меньше трудностей в практическом исполнении. Тем не менее, существуют проблемы в получении равномерно обработанного грунтового массива, из-за увеличения срока работ [8].

Исторически первым был способ биоаугментации, разработанный в Калифорнии. Метод предусматривает закачку во влажный грунт культуры микроорганизма *Sporosarcina pasteurii*. В ходе своей жизнедеятельности эта бактерия вырабатывает карбонат кальция — основной компонент известняков и мраморов, а также цемента. Таким образом, дисперсные грунты в обработанной зоне постепенно приобретают свойства, близкие к песчануку. Помимо обеспечения сейсмической устойчивости, эта технология имеет и более очевидные

области применения, в том числе в борьбе с плывунами, подтоплением. Экспериментальная проверка предлагаемой методики проводилась в 200-литровых бочках, заполненных стерильным песком, к которому добавлялась бактериальная культура. В емкостях контролировались такие параметры, как уровень необходимых для бактерий питательных веществ, содержание кислорода и др. *Sporosarcina pasteurii* известна своим свойством снижать кислотность грунта. Именно этот эффект приводит к тому, что ионы Ca^{2+} и CO_3^{2-} , растворенные в грунтовых водах, формируют нерастворимую соль, цементирующую грунт. Натурные испытания методики (рис. 1) выполнены в США [1, 2, 8, 9], Нидерландах [10], Японии [4] и Сингапуре [5–6]. По результатам рекомендовалось применение этой технологии при возведении дамб и набережных, для стабилизации грунтов вокруг тоннелей. Более того, предлагалось также использовать бактерии для предотвращения распространения с грунтовыми водами различных опасных для экологической обстановки загрязнений. Эксперты отмечают, что использование биологических методов представляется логическим продолжением развития методов технической мелиорации грунтов от механических технологий (таких, как «стена в грунте») до чисто физических (замораживание, обжиг) и физико-химических методов (например, электросиликатизация).

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования технологии MICP является моделирование процесса, планирование его эффективных сценариев, предсказание результатов. В литературе

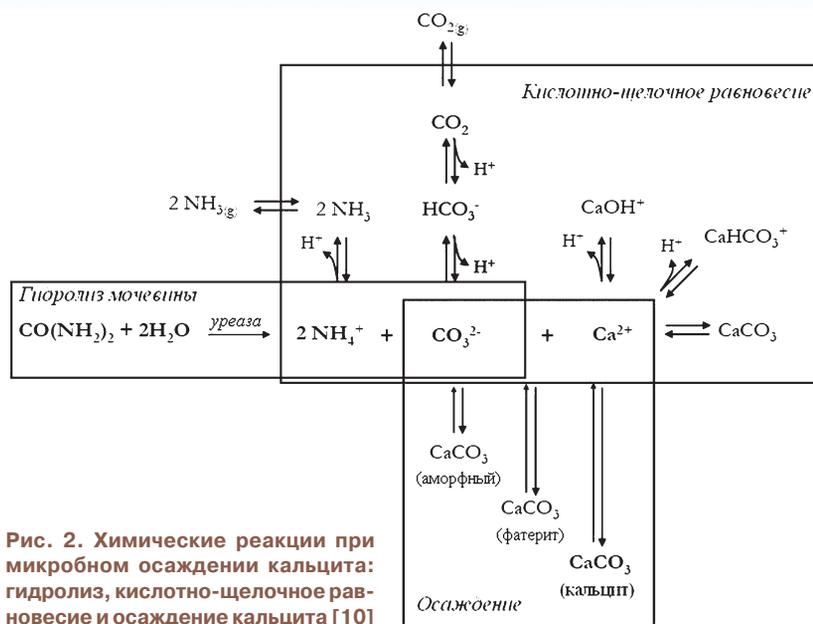


Рис. 2. Химические реакции при микробном осаждении кальцита: гидролиз, кислотно-щелочное равновесие и осаждение кальцита [10]

предложено множество формулировок математических моделей, описывающих жизнедеятельность бактерий и сопутствующие физико-химические процессы. Один из первых вопросов, возникающих при математическом описании любого процесса, — выбор размерности модели; чаще всего строятся двумерные или одномерные модели процесса, реже трехмерные. Математическая модель должна учитывать все наиболее значимые процессы, происходящие при осаждении кальцита (рис. 2). Мочевина под влиянием уреазы — фермента, вырабатываемого некоторыми бактериями, подвергается гидролизу с образованием аммиака и угольной кислоты. Уреазы — белок, состоящий из аминокислот, который ускоряет химическую реакцию; специфичность этого белка заключается в том, что он разлагает только мочевину. В растворах, содержащих угольную кислоту, создается сложная равновесная система с появлением карбонат-иона, что в присутствии ионов кальция приводит к осаждению кристаллов кальцита.

Авторами данной работы моделирование проводилось в рамках исследования по захоронению углекислого газа в геологических формациях. Основные глубины захоронения CO_2 — 800–1000 м; такие глубины необходимы для обеспечения давления, при котором CO_2 находится в жидком состоянии. Чтобы предотвратить выход CO_2 на поверхность, геологические формации должны быть покрыты непроницаемым слоем. В то же время инъекция CO_2 должна происходить путем бурения скважины через этот непроницаемый слой, что может вызывать образование трещин в нем. Основная идея закупорки появляющихся трещин заключается в использовании биоиндуцированного кальцита, который будет внедряться в открытые поры, что по своей сути равносильно внедрению цемента. Главное отличие биоиндуцированного кальцита от обычного цемента в том, что кальцит будет «производиться» на месте.

Чтобы показать возможность применения этих технологий в полевых условиях, необходимы значитель-

ные финансовые затраты. Большое количество компонентов, взаимодействующих друг с другом, предполагает сложные вычисления для выполнения экспериментов, поэтому для проведения этих дорогих экспериментов необходима компьютерная модель, с помощью которой можно предсказать необходимые стадии внедрения Са и экспериментальные параметры.

Биологическое цементирование непроницаемого слоя, поврежденного в процессе бурения, представляется перспективным еще и потому, что является простым и недорогим способом увеличения запаса захороненного CO_2 в горных породах. Введение бактерий в горную породу и постепенный гидролиз мочевины, катализируемой бактериями, ведет к осаждению кальцита, который распределяется шире и более гомогенно по сравнению с прямой инъекцией в основание, когда пропускная способность канала резко снижается из-за немедленного осаждения Са в зоне инъекции.

При оптимизации процесса биоцементации важно оценить влияние концентрации биомассы при различных схемах ее внедрения на количество осаждаемого кальцита. Для наиболее полного описания процесса предложена объединенная биолого-химическая модель, включающая ключевые микробиологические и химические реакции. Система состоит из двух жидких фаз (рассола и CO_2), газовой фазы, трех твердых фаз (пористая горная порода, биопленки, кальцит) и взвешенных растворенных компонентов. Биопленки рассматривают как множество микроорганизмов, расположенных на какой-либо поверхности, клетки которых прикреплены друг к другу. Обычно клетки погружены в выделяемое ими внеклеточное полимерное вещество (внеклеточный матрикс) — слизь [1].

Основные допущения модели следующие. К исходным компонентам модели относят вода (w), общий углерод (C_{Tot}), взвешенная биомасса (b), биопленки (f), субстрат (s), акцептор электронов — кислород (e), кальцит (c), мочевина (u), общий азот (N_{Tot}), ионы кальция (Ca^{2+}), хлора (Cl^-) и натрия (Na^+).

Две жидкие фазы (рассол и углекислый газ), которые соответственно смачивают и не смачивают твердые поверхности, могут присутствовать в порах горной породы. Рассол состоит из воды, углерода и второстепенных компонентов: натрия, хлора, кальция, биомассы, субстрата, кислорода, мочевины и азота. В рассоле могут находиться разные соли, но предполагается, что их совокупное воздействие на плотность, вязкость и растворимость CO_2 могут быть представлены в виде эквивалентной концентрации хлорида натрия. В составе газовой фазы могут быть вода, CO_2 и кислород. Массы всех других компонентов в газовой фазе незначительны, поэтому предполагается, что эти компоненты не растворяются в газовой фазе. Массовая доля вторичных компонентов рассчитывается с использованием закона действующих масс, поэтому они

должны быть в равновесии с их соответствующими первичными компонентами.

Вторичными компонентами в модели являются углекислый газ (CO_2), бикарбонат (HCO_3^-) и карбонат (CO_3^{2-}) как составные части общего углерода C_{Tot} , аммиак (NH_3) и аммоний (NH_4^+) как составные части общего азота N_{Tot} и ионы водорода и гидроксид-ионы как составные части воды.

Подробное представление реакций (гидролиза мочевины, осаждения, растворения) и бактериальной активности дано в работах [1, 10].

При создании компьютерной модели использована программа DuMu^x (Штутгартский университет, Германия), которая допускает вариации различных нелинейных комбинаций параметров [3], с управлением временных интервалов, что, в свою очередь, увеличивает эффективность моделирования. Все расчеты были выполнены для радиального домена с горизонтальной трещиной посередине. Для простоты трещина была реализована как сильнопроницаемый слой толщиной 5 см и длиной 5 м. Высота и радиус домена — по 10 м, угол при вершине $22,5^\circ$ (рис. 3а). Домен предполагается радиально-симметричный.

Начальные условия: гидростатическое давление в середине домена $p_w = 1,79$ МПа и плотность рассола

1087 кг/м^3 . На внешнем радиусе модели выбрана граница 1-го рода (рис. 3б). Начальные значения концентраций Ca^{2+} , мочевины, N_{Tot} , O_2 , взвешенной биомассы и субстрата заданы равными нулю, Na^+ и Cl^- — $0,007$ моль/моль, молярная доля C_{Tot} — $1,79 \cdot 10^{-7}$. Граничные условия 2-го рода приняты на поверхности и в основании домена, а также в позиции минимального радиуса, за исключением небольшой области для инъекций в середине домена. Поскольку инъекция осуществлялась для наблюдения за осаждением кальцита и изменением проницаемости трещины, размеры сетки уменьшаются в сторону трещины и снижения радиуса. Проницаемость трещины, равная $1,645 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, была определена в ходе моделирования при давлении закачки воды $3,79$ МПа, постоянной скорости закачки — $3,1545 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, через 4 ч от начала закачки.

Результаты моделирования. Бактерии *Sporosarcina pasteurii* требуют специальных условий для роста и распада. Для подбора рационального режима МПСР с заданной интенсивностью осаждения кальцита и места его расположения нами осуществлялось моделирование процесса инъекций. В таблице представлены порядок и длительность проведения инъекций. Бактерии в качестве источника энергии должны иметь субстрат, кислород как акцептор электронов и углерод для обмен-

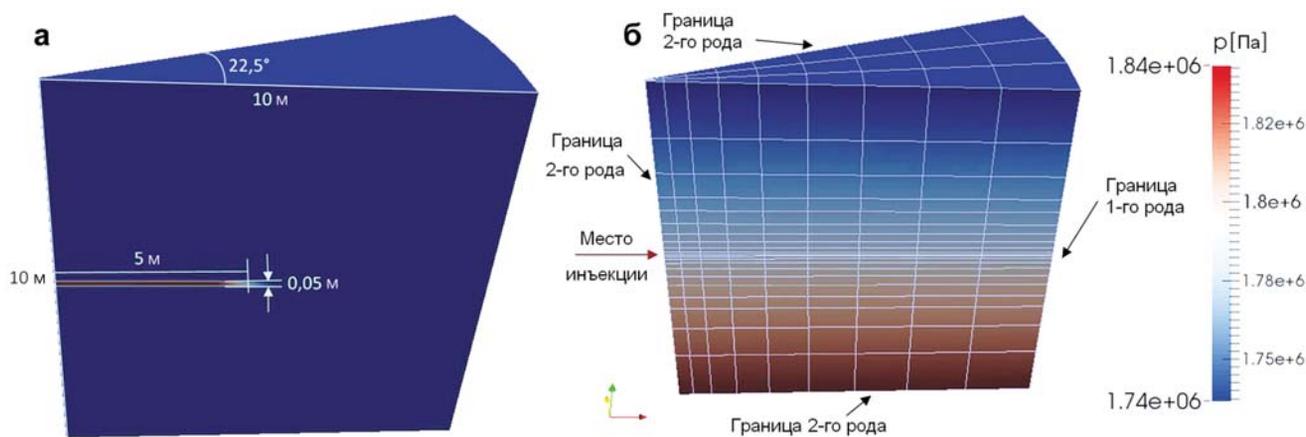


Рис. 3. Расчетный элемент со слоем с высокой проницаемостью в середине: размеры домена (а); граничные условия и распределение гидростатического давления (б)

Схема инъекций

Этап	Продолжительность этапа, ч	Время с начала опыта, ч	C_{Tot} , моль/моль	Концентрация, г/л							
				Na^+	Ca^{2+}	u	N_{Tot}	O_2	Cl^-	s	b
Инъекция бактерий	0,82		$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,00379			3,184	0,008	3,184	3	0,04
Нет потока	15,7	$t_1 = 16,52$		0							
Инъекция мочевины	12		$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,00379		20	3,184	0,008	3,184	3	
Нет потока	11	$t_2 = 39,52$		0							
Промывание	1		$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,00379			3,184	0,008	3,184	3	
Инъекция кальция	12	$t_3 = 40,52$	$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,00012	13,5072	20	3,184	0,008	3,184	3	
Нет потока	14,38	$t_4 = 52,52$		0							
Конец опыта		$t_5 = 66,90$									

на и роста, поэтому указанные компоненты дозируются в промывочной жидкости. На первом этапе с раствором вводятся бактерии. Затем инъекция прекращается на 15,7 ч. Это время необходимо для того, чтобы бактерии прикрепилась к твердой поверхности или друг к другу и вырастили биопленки. Далее нагнетается раствор, насыщенный мочевиной для роста биопленок и производства фермента уреазы. Гидролиз мочевины сопровождается образованием аммиака и углекислого газа, который распадается до карбонат-ионов и воды. Заканчивается процесс инъекцией, насыщенной кальцием, необходимым для осаждения кальцита.

Повышение pH наблюдается при $t_2 = 39,52$ ч после инъекций, насыщенных мочевиной. После прекращения инъекций с кальцием pH снижается из-за осаждения кальцита. В конце моделирования в момент времени $t_3 = 66,90$ ч pH уменьшается, так как прекращается

диссоциация, осаждение кальцита, наблюдается только перемешивание жидкой фазы.

Увеличение содержания взвешенной биомассы наблюдается вокруг трещины; внутри трещины массовая доля взвешенной биомассы снижалась из-за прикрепления микроорганизмов к твердотельной матрице и из-за инъекции, не содержащей бактерии.

После инъекций, насыщенных мочевиной, массовая доля мочевины уменьшается из-за его гидролиза. В конце моделирования массовая доля общего азота обусловлена, в основном, аммонием, который образовался из-за протонирования аммиака при гидролизе мочевины, влияя на pH. Уменьшение массовой доли мочевины в системе приводит к увеличению N_{Tot} . Количество кислорода в системе в конце моделирования практически равно нулю, что свидетельствует о полном потреблении его бактериями.

Распределение биопленки и кальцита в конце моделирования показаны на рис. 4-I, II. Биопленка становится видимой при $t_1 = 16,52$ ч — после инъекции бактерий. Бактерии присоединяются к твердым поверхностям и биопленке. Объемная доля биопленки с течением времени увеличивается и достигает максимального значения в конце моделирования на момент времени $t_3 = 66,90$ ч. Кальцит появляется после начала инъекций, насыщенных кальцием ($t_3 = 40,52$ ч), с течением времени его концентрация увеличивается и достигает максимального значения в конце моделирования.

Разрезы по линиям A-B и C-D ориентированным перпендикулярно трещине и вдоль нее, показывают разницу между концентрациями биопленки и кальцита в трещине и в окружающей породе. Наибольшие концентрации биопленки фиксируются на расстоянии 2 м от места инъекции, кальцита — на расстоянии 1 м (рис. 4-Iв, IIв). В месте инъекции максимума концентрации не наблюдается из-за высокого давления, за счет которого вымываются внедряемые компоненты. Кроме того, из-за высокого градиента давления биопленки вблизи места инъекции отсоединяются от твердой фазы.

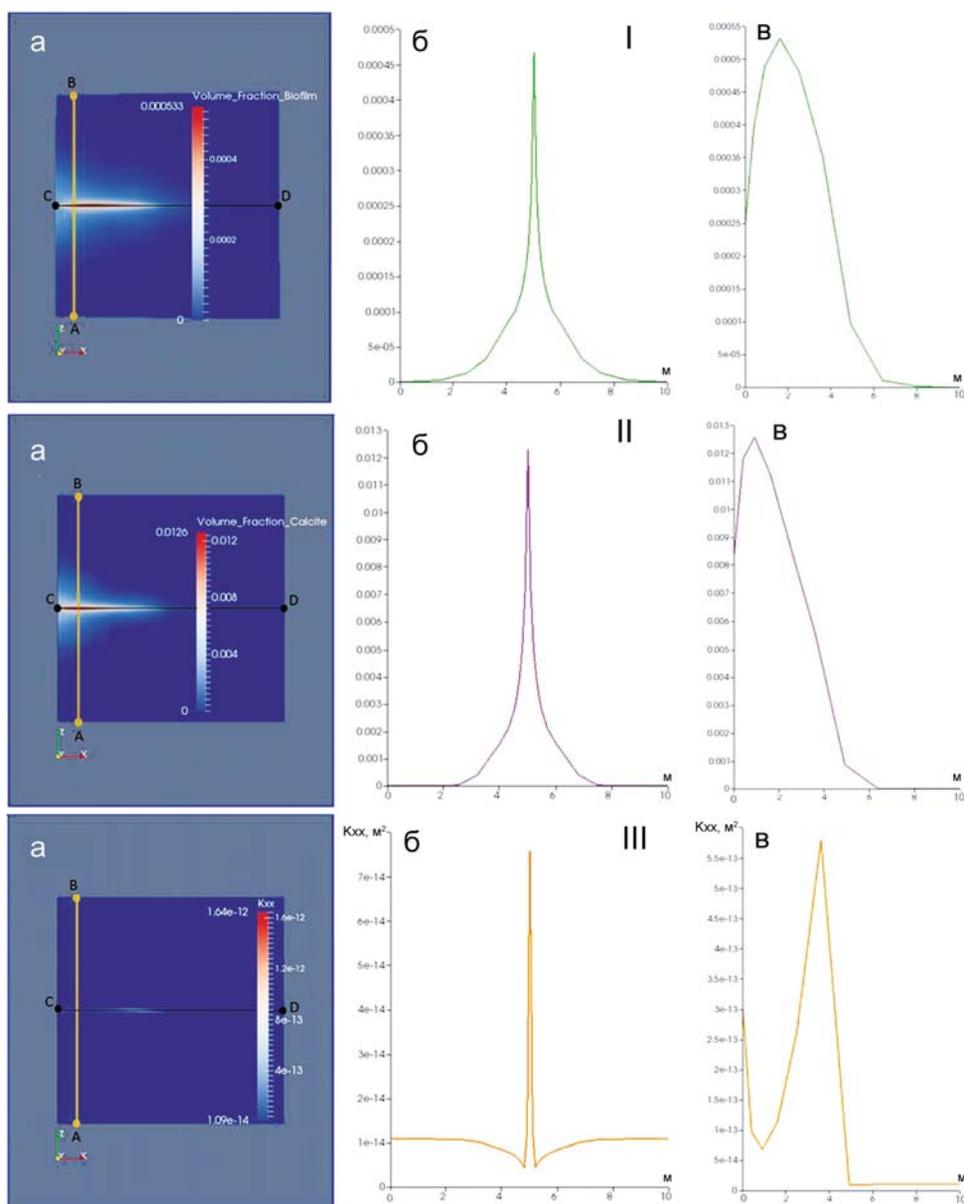


Рис. 4. Распределение в пространстве биопленки (I), кальцита (II) и проницаемости трещины (III) в конце MICP-моделирования: а — в плоскости; б-в — изменение параметров по разрезам перпендикулярно к трещине (б — по линии A-B) и вдоль нее (C-D)

Увеличение концентрации кальцита согласуется с уменьшением проницаемости. Разрез вдоль трещины (рис. 4-IIIв) показывает, что на расстоянии 1 м от места инъекции наблюдается наименьшее значение проницаемости, которому соответствует максимальная концентрация кальцита. Проницаемость (K_{xx}) снизилась почти на 2 порядка от начального значения: от $1,645 \cdot 10^{-12}$ до $7,5 \cdot 10^{-14}$ м². В радиусе 3 м от места инъекции проницаемость составляет $2,5 \cdot 10^{-13}$ м², а в радиусе 5 м — $5,8 \cdot 10^{-13}$ м². Разрез по линии А-В показывает, что проницаемость горной породы уменьшается также в непосредственной близости от трещины от $1,09 \cdot 10^{-14}$ до $3,2 \cdot 10^{-15}$ м² из-за осаждения кальцита в горной породе.

Заключение

Технология МІСР является возможным путем повышения безопасности хранения CO₂, но исследования этой методики в ходе полевых экспериментов могут быть дорогими. Численное моделирование — это основной способ предсказать поведение системы. Представленное исследование сделано для оценки осаждения кальцита в натуральном масштабе. Моделирование проводилось с помощью 3D домена. По результатам моделирования показано, что проницаемость трещины может уменьшиться на порядок в радиусе 3 м и в 3 раза в радиусе 5 м от места инъекции. Максимально проницаемость снизилась на 2 порядка от начального значения. Моделирование показало хорошие результаты по снижению проницаемости трещины, что позволит избежать утечки CO₂ из хранилища, но эти результаты могут отличаться от экспериментальных измерений из-за введенных допущений. Для обеспечения точности и достоверности результатов МІСР необходимо продолжить проверки существующей модели.

Идентификация различных технологических ограничений, таких как активность бактерий, скорость реакций, позволяет контролировать процесс МІСР для его использования в геотехнической практике. Количество приложений МІСР-технологий неуклонно возрастает в последние годы, начиная от изменения механических и фильтрационных свойств горных пород до иммобилизации тяжелых металлов и углекислого газа. Проведенные экспериментальные исследования, численное моделирование обеспечили значительный прогресс в понимании и контроле процесса МІСР на объектах разного уровня — от микро до макро.

Дальнейшее развитие в этой области включает: оценку компонентов подземной экосистемы и их взаимодействия; картографирование и моделирование изменчивости структуры, состава горных пород и подземных вод, их динамики, а также бактериального разнообразия; совершенствование техники для мониторинга за процессом биоцементирования горных пород в режиме реального времени. Укрупнение задач требует обширных экспериментальных работ, тестирования гипотез благодаря присущей природным системам сложности. Экспериментальная работа должна быть дополнена строгими аналитическими решениями и численным моделированием для определения принципов управления природно-техногенной системой. Междисциплинарные исследования требуют большего взаимодействия между учеными и инженерами, формирования

междисциплинарных рабочих групп и отделов. Последнее обстоятельство определяет подходы к подготовке специалистов нового поколения, способных использовать свой опыт и знания при работе в междисциплинарной команде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cunningham A.B., Gerlach R., Spangler L. et al. Reducing the risk of well bore leakage of CO₂ using engineered biomineralization barriers // Energy Procedia. — 2011. — V. 4. — P. 5178–5185.
2. DeJong J.T., Soga K., Kavazanjian E. et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges // Géotechnique. — 2013. — V. 63. — N 4. — P. 287–301.
3. Flemisch B., Darcis M., Erbertseder K. et al. DuMu³: DUNE for Multi-Phase, Component, Scale Physics, Flow and Transport in Porous Media // Advances in Water Resources. — 2011. — V. 34 (9). — P. 1102–1112.
4. Hata T., Tsukamoto M., Mori H. et al. Evaluation of multiple soil improvement techniques based on microbial functions / Proc. GeoFrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. — Dallas, TX: ASCE Geotechnical Special Publication 211. — P. 3945–3955.
5. Ivanov V. Microbial geotechniques / Environmental microbiology for engineers. — Boca Raton (FL, USA): CRC Press, 2010. — P. 279–286.
6. Ivanov V., Chu J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. — 2008. — V. 7(2). — P. 139–153.
7. Karatas I., Kavazanjian E., Rittmann B.E. Microbially induced precipitation of calcite using pseudomonas denitrificans / 1st International Conference on Bio-Geo-Civil Engineering. — Netherlands, 2008, June 23–25. — P. 58–66.
8. Martinez B.C. Experimental and numerical upscaling of MICP for soil improvement: Doctoral dissertation. — University of California, 2012.
9. Mitchell J.K., Santamarina J.C. Biological considerations in geotechnical engineering // J. Geotech. Geoenviron. Eng. — 2005. — V. 131(10). — P. 1222–1233.
10. Van Paassen L.A., Ghose R., Van der Linden T.J.M. et al. (). Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment // J. Geotech. Geoenviron. Eng. 2010. — V. 136. — N 12. — P. 1721–1728.

© Шигорина Е.Г., Строкова Л.А., 2015

Шигорина Елена Геннадьевна // elenashigorina@gmail.com
Строкова Людмила Александровна // strokova@sibmail.com

УДК 550.8

**Рослов Ю.В., Воронов М.А. (ООО «Сейсмо-Шельф»),
Григоренко Ю.Н. (ФГУП «ВНИГРИ»), Аккуратов О.С.
(ФГУП ГНЦ РФ «ВНИИГеосистем»)**

ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕЛКОВОДЬЕ И В ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЕ

*Представлены основные элементы технологии донной сейсморазведки, реализованной российской компанией ООО «Сейсмо-Шельф», и результаты ее апробации в сложных геолого-гидрологических условиях при выполнении полевых работ 2D/4C в Печорской губе на участках «суша — море». **Ключевые слова:** российские сейсмические технологии, донная сейсморазведка.*

Roslov Yu.V., Voronov M.A. (Seismo-Shelf), Grigorenko Yu.N. (VNIIGRI), Akkuratov O.S. (VNIIGeoinformssystem)

RUSSIAN SEABED SEISMIC TECHNOLOGY ADOPTED FOR SHALLOW WATER AND TRANSITION ZONES

Key elements of seabed seismic technology developed by Seismo-Shelf and results its testing in framework of 2D/4C seismic survey in the transition zone of Pechora Sea characterized with very