

УДК 532.685

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО ПЕРЕНОСА СВОБОДНОГО ГАЗА ВО ВЛАГОНАСЫЩЕННОЙ ПЕСЧАНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

© 2025 г. Н. А. Барышников*, П. Е. Зенченко, Н. А. Юдочкин, Е. В. Зенченко

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: baryshnikov.na@idg.ras.ru*

В работе представлены результаты экспериментального моделирования пузырькового переноса свободного газа во влагонасыщенной песчаной пористой среде. Основное внимание уделено разработке и апробации оригинальной методики лабораторного исследования с использованием оптически прозрачной плоской микромоделю, позволяющей регистрировать пространственное распределение газонасыщенности методом цифровой обработки изображений. Показано, что при прохождении пузырька газа через насыщенный песчаный образец формируется проводящий канал, сопровождающийся резким увеличением фильтрационного расхода, а в поровом пространстве сохраняется остаточная газонасыщенность. В опытах с единичными пузырьками величина остаточной газонасыщенности не зависела от объема газа, а при последовательной прокачке нескольких пузырьков стабилизировалась на уровне ~ 0.25 . Существенных отклонений фильтрационных свойств от линейных зависимостей не выявлено. Полученные результаты имеют методическое значение и могут быть использованы для уточнения параметров моделей двухфазной фильтрации при численном описании переноса газа в донных отложениях Арктического шельфа.

Ключевые слова: пористая среда, газонасыщенность, остаточная насыщенность, фильтрационные свойства, двухфазное течение, плоская микромодель, Арктический шельф, газовые гидраты.

Для цитирования: Барышников Н.А., Зенченко П.Е., Юдочкин Н.А., Зенченко Е.В. Экспериментальное моделирование пузырькового переноса свободного газа во влагонасыщенной песчаной пористой среде // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 30–43. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_30

Введение

Объектом исследования данной работы является перенос газа, возникающего в процессе разложения газового гидрата в донных отложениях Восточно-Сибирского Арктического шельфа, от места его накопления до поверхности дна. Газогидратные залежи в этом регионе приурочены к зоне подводной мерзлоты и относятся к так называемым газогидратам, связанным с шельфовой мерзлотой (*permafrost-associated gas hydrates*) [Shakhova et al., 2019; Gavrilov et al., 2020]. Они существуют в пределах так называемой зоны стабильности, границы которой определяются исходя из термобарических условий, обеспечивающих стабильность гидрата. Изменения теплового режима и деградация подводной мерзлоты могут приводить к сужению этой зоны и потере устойчивости газогидратов, в результате чего часть их объема диссоциирует с образованием свободного газа. Освободившийся газ может мигрировать вверх по толще слабосцементированных донных осадков и достигать поверхности морского дна. Механизм переноса газа через толщу осадочных пород при этом до сих пор остаётся мало изучен. Ряд исследований рассматривает микромеханизмы миграции газа, включая рост и перемещение пузырьков в осадках [Boudreau, 2012], а также возможные пути восходящего переноса метана в гидратосодержащих системах морских осадков [Liu et al., 2022]. В лабораторных условиях исследовалась газопроницаемость замороженных песчаных образцов при различных степенях насыщения газовыми гидратами и льдом, а также влияние фазовых переходов на

фильтрационные свойства среды [Waite et al., 2009; Chuvilin et al., 2022]. Существенное влияние на механизм фильтрации газа оказывает поровая структура и присутствие мелкодисперсной фракции: даже небольшое количество глинистых частиц приводит к заметному снижению газопроницаемости из-за уменьшения эффективного диаметра пор и усиления капиллярного удерживания [Чувилин и др., 2018]. Данные исследования указывают на сложность процессов переноса газа в природных осадках и показывают важность изучения микромасштабных процессов, таких как внедрение пузырьков газа и образование проводящих каналов, для описания макроскопических потоков газа в природных системах.

Задача о миграции газа через толщу донных отложений имеет ряд особенностей по сравнению с традиционными задачами о многофазных потоках, возникающих в процессе нефте- и газодобычи. Прежде всего, это чрезвычайно малые характерные гидродинамические градиенты давления. Скорость потоков и распределение фаз в поровом пространстве при таких условиях определяется не только сопротивлением со стороны скелета, но и их взаимодействием друг с другом: газ проникает через водонасыщенную среду, находящуюся в гидростатическом равновесии, при этом основную роль играют капиллярные силы. В рамках традиционной модели о двухфазном вытеснении принято считать, что капиллярные силы учитываются формой кривых фазовых проницаемостей и капиллярного давления [Баренблатт и др., 1984]. В рассматриваемой задаче критическое значение имеют следующие параметры этих кривых: величина минимальной газонасыщенности, при которой вытесняющая, менее смачивающая газовая фаза становится подвижной, а также величина газонасыщенности на фронте вытеснения. Для построения адекватной модели транспорта газа через донные отложения эти параметры необходимо определить экспериментально, на микроуровне. Цель данной работы состояла в создании и апробации лабораторной установки и методики измерений, позволяющих визуализировать процесс пузырькового переноса в насыщенной песчаной пористой среде и количественно оценивать динамику изменения её газонасыщенности.

Разработанная методика должна была позволить получить экспериментальные данные о распределении фаз при прохождении пузырьков газа через песчаную среду, моделирующую слаболигитифицированные донные отложения Арктического шельфа, и тем самым обеспечить возможность уточнения параметров моделей двухфазной фильтрации.

Для решения поставленной задачи была проведена модификация лабораторной установки для изучения влияния свободного газа в поровом пространстве на линейность фильтрационных свойств [Baryshnikov et al., 2023]: спроектирована и изготовлена плоская оптически прозрачная микромодель. Модель позволяет исследовать двухфазные потоки на микроуровне в образце грунта, тонком (0.5 мм) слое, зажатым между прозрачными плоскостями. Это даёт возможность визуально следить за распределением газонасыщенности в процессе внедрения газа в поровое пространство и уточнить модель вытеснения газом жидкости. В качестве модельной среды в настоящей работе использовался однородный кварцевый песок. Несмотря на то, что природные донные отложения обычно содержат значительную долю мелкодисперсных частиц, влияющих на газопроницаемость и характер движения газа, использование песчаной среды обеспечивает высокую воспроизводимость экспериментальных условий и позволяет наблюдать фундаментальные механизмы формирования проводящих каналов и распределения газовой фазы. Полученные таким образом закономерности могут быть сопоставлены с более сложными условиями природных осадков. В ходе опытов через насыщенный модельный образец пропусклся пузырёк газа различного объёма (от 20 до 60% от суммарного порового объёма образца). В процессе прохождения пузырька газа через образец производилось измерение его эффективной проницаемости, а также регистрировалось распределение газонасыщенности в плоскости образца. Ниже представлено описание лабораторной установки, методики, а также результаты экспериментального исследования закономерностей распределения фаз в процессе проникновения газа в насыщенную песчаную среду, моделирующую породы донных отложений Арктического шельфа.

Лабораторная установка и методика измерений

На рисунках 1, 2 показаны схема и фото изготовленной плоской модели. В качестве основы использован оптически прозрачный плексигласовый брусок, в котором проточена область для размещения исследуемой среды (ячейка), а также необходимые подводящие и отводящие каналы. Ячейка имеет прямоугольную форму с размерами 15×18 мм и глубиной 0.5 мм. Исследуемая среда размещается в ней перед началом опытов, после чего через упругую прозрачную мембрану (лист ПВХ) прижимается верхней пластиной. Это позволяет обеспечить герметизацию всей системы и исключить перетоки жидкости вдоль верхней и нижней плоскостей ячейки. Кроме того, подобное решение обеспечивало достаточно плотную упаковку частиц песка и предотвращало их разуплотнение при подаче газа. Подводящий канал диаметром 1.3 мм и длиной 180 мм выполнен в форме «змейки». Это позволяет контролировать скорость продвижения пузырьков газа на пути к ячейке. В модели также создан дополнительный канал в обход ячейки, что позволяет производить прокачку жидкости через систему каналов, не затрагивая при этом исследуемую среду.

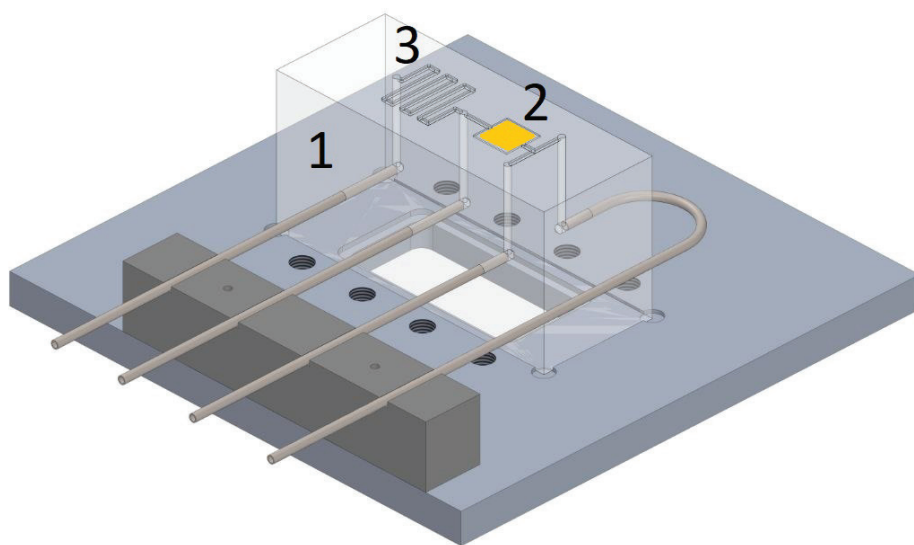
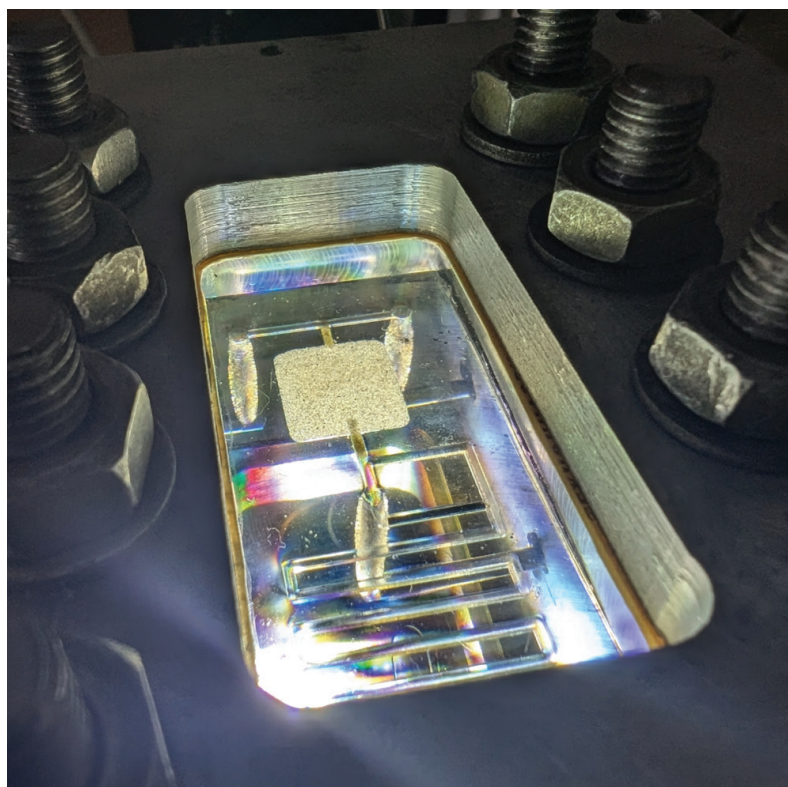


Рис. 1. 3D модель плоской модели:
1 – основа модели: оптически прозрачный плексигласовый брусок,
2 – область размещения пористой среды, 3 – подводящий канал

Рис. 2. Фото плоской модели с образцом пористой среды



На рисунках 3, 4 показаны принципиальная схема и фото лабораторной установки. Для проведения лабораторных опытов была адаптирована методика, использованная нами ранее [Baryshnikov et al., 2023; 2024], для изучения нелинейных фильтрационных свойств низкопроницаемых горных пород. Данная методика основана на проведении измерений эффективной проницаемости среды в процессе медленного спада градиента порового давления. Это позволяет исследовать фильтрационные свойства образцов при градиентах давления, сопоставимых с гидростатическим (0.01 МПа/м), что крайне важно для рассматриваемой задачи.

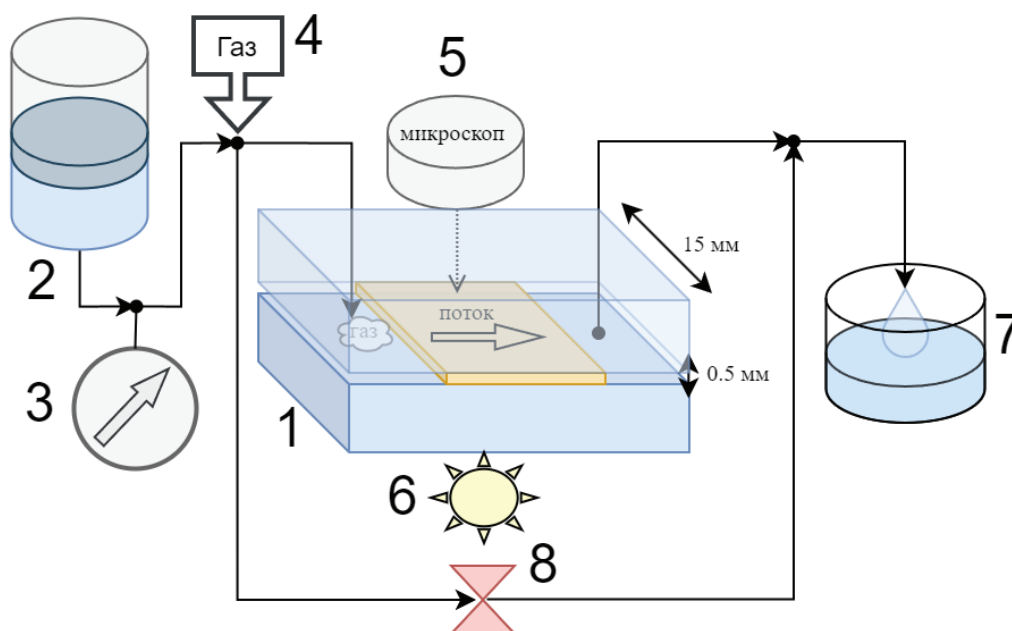


Рис. 3. Принципиальная схема установки: 1 – плоская, оптически прозрачная модель, 2 – гидроаккумулятор, 3 – датчик порового давления, 4 – точка инъекции газа, 5 – микроскоп, 6 – источник света, 7 – весы для измерения массы жидкости, прошедшей через образец среды, 8 – обходной клапан для выравнивания давления

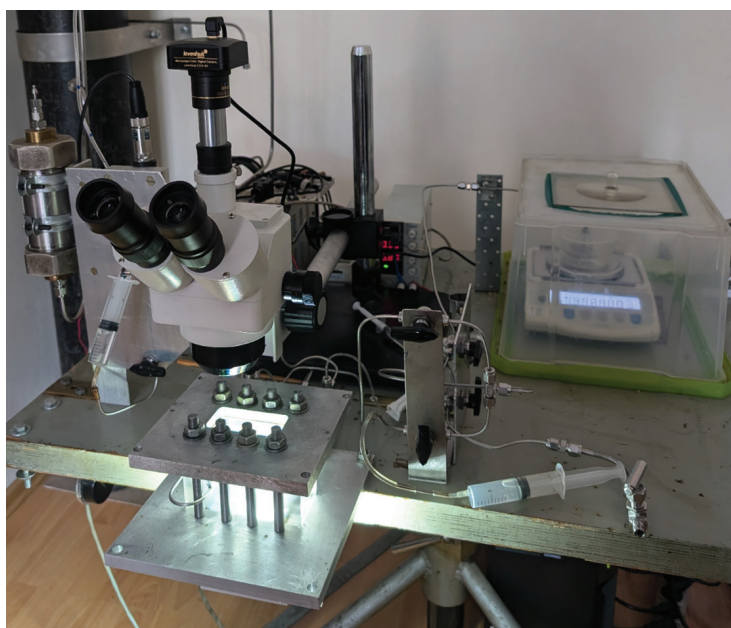


Рис. 4. Фото установки

Образец пористой среды помещается в ячейку, после чего производится сборка плоской модели (рис. 3). Насыщение образца производится непосредственно в установке. В качестве рабочей жидкости используется силиконовое масло ПМС-5 с вязкостью 5 сП. Выбор данной жидкости был обусловлен

как техническими особенностями конструкции установки, так и её физико-химическими свойствами. В отличие от водных растворов, эта жидкость не взаимодействует со скелетом образца. Кроме того, из-за хорошей смачиваемости её использование позволяет получить высокую степень начального насыщения образца. Поток жидкости через образец происходит под действием заданного перепада давления, создаваемого при помощи гидроаккумулятора. Давление жидкости на входе в модель измеряется преобразователем избыточного давления NAT-8257 производства Trafag AG с диапазоном от 0 до 0.16 МПа и точностью 0.3% от верхнего предела измерений. Давление на выходе модели всегда равно атмосферному. Скорость фильтрации жидкости вычисляется по данным об изменении массы жидкости на весах (ViBRA AJH-420CE с дискретностью 0.001 г).

Для исследования зависимости эффективной проницаемости от градиента порового давления производится измерение проницаемости образца в процессе спада порового давления. Для этого в начальный момент времени на входе в модель создаётся определённое начальное поровое давление (подбирается исходя из проницаемости среды). Параметры гидроаккумулятора подобраны таким образом, чтобы скорость снижения градиента порового давления была достаточно низкой. Это позволяет считать поток квазистационарным и пользоваться при дальнейшем анализе уравнениями для стационарного потока. Результат измерения представляется в виде зависимости эффективной проницаемости от градиента порового давления. Эффективная проницаемость образца вычисляется по данным о скорости фильтрации жидкости u и градиенте порового давления $gradP$ по закону Дарси:

$$k = \eta \frac{u}{|gradP|}.$$

В качестве градиента давления берётся отношение перепада порового давления на концах образца к его длине. Для численного вычисления производной массы жидкости по времени применяется метод регуляризации квадратичного отклонения (TVR) [Chartrand, 2011]. Такой способ позволяет существенно повысить точность измерения при приближении к около нулевым величинам расхода [Baryshnikov et al., 2022].

Инъекция газового пузырька производится в подводящий канал на входе в модель при помощи медицинского шприца. Исследуемый образец просвечивается светодиодным источником света с контролируемой яркостью. Визуальное наблюдение за процессом вхождения пузырька газа в образец производится в проходящем свете при помощи микроскопа (Микромед МС-2) и цифровой камеры (Levenhuk C310 NG). Изображения в дальнейшем обрабатываются для получения распределения газонасыщенности в плоскости образца.

Методика обработки изображений для получения пространственного распределения газонасыщенности образца

Для получения пространственного распределения насыщенности образца газом была применена следующая методика цифровой обработки изображений. В основе методики лежит метод исследования каждого изображения относительно первого изображения в данной серии эксперимента. Диаграмма обработки графических данных представлена на рис. 5. В синих блоках диаграммы выходными данными являются матрицы изображений, в зеленых – численные значения. Обработка изображений выполнялась с использованием стандартных библиотек языка Python, включая NumPy (для работы с массивами данных) и Pillow (PIL) для загрузки и предварительной обработки изображений.

Первый этап (рис. 5, (I)) представлен подготовкой изображения: на данном этапе загружаются изображения – первое в серии экспериментов и исследуемое. Каждое изображение преобразуется в три матрицы с размерностью исходного изображения, содержащие значения интенсивности свечения в синем, зеленом и красном диапазонах видимого света. Затем из матриц первого изображения вычитаются матрицы следующих в серии эксперимента изображений (рис. 6, (2)).

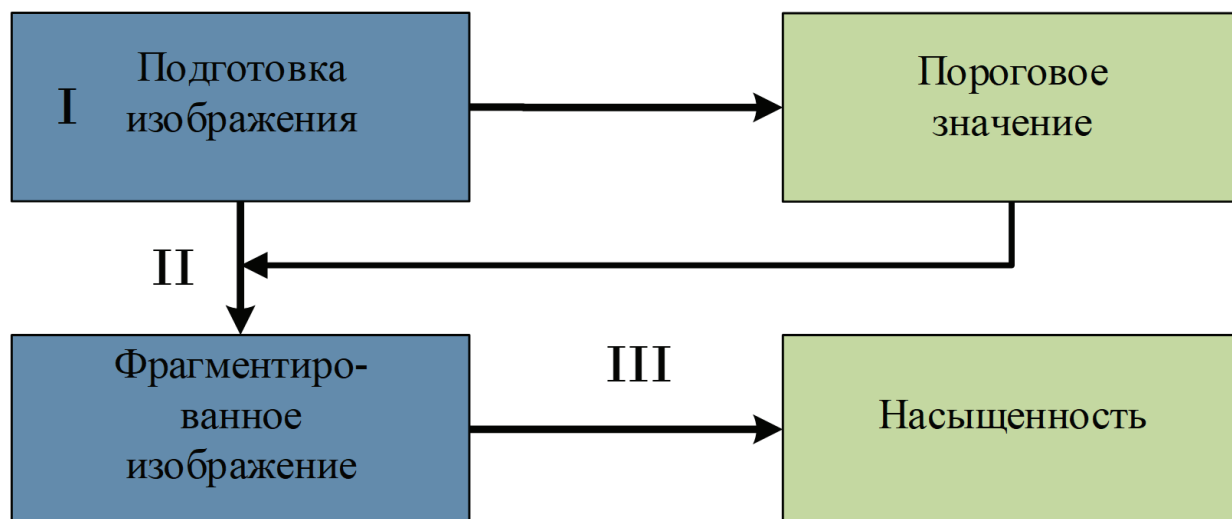


Рис. 5. Основные этапы обработки изображения для получения газонасыщенности

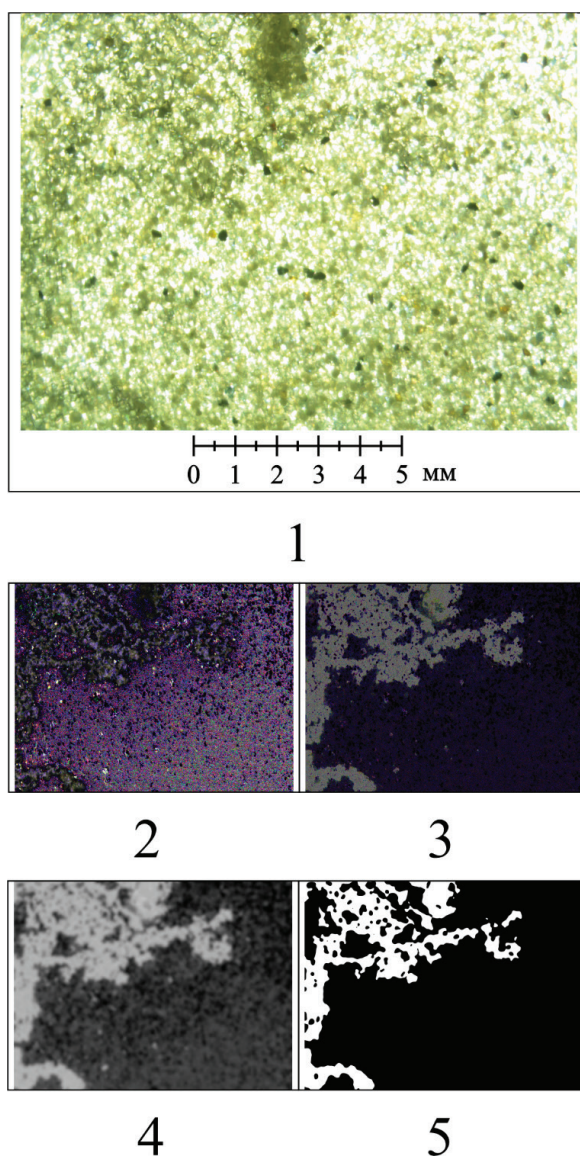


Рис. 6. Стадии обработки цифровых изображений для получения пространственного распределения газонасыщенности: 1 – исходное изображение, 2–4 стадии обработки, 5 – результат обработки – распределение газонасыщенности

Учитывая, что значения интенсивности свечения пикселя для графических файлов находятся в диапазоне от 0 до 255 необходимо взять абсолютные значения разности. Данная операция позволяет исследовать изменения исследуемой области независимо от увеличения или уменьшения интенсивности свечения источника. Для повышения контрастности области с изменениями и увеличения динамического диапазона изображений, абсолютные значения поэлементно умножаются на коэффициент усиления (рис. 6, (3)).

Пороговые значения яркости для пористого материала были получены в предварительных экспериментах, в которых проводилось насыщение рабочей жидкостью кварцевого песка. При насыщении в наблюдаемой области увеличивалась прозрачность образца и интенсивность источника свечения. Таким образом были оценены значения интенсивности свечения источника для полностью заполненной области газом и рабочей жидкостью.

На втором этапе цифровой обработки (рис. 5 (II)) полученные матрицы преобразуются в монохромное изображение, после чего оно преобразуется фильтром Гаусса, что позволяет убрать ложную высокочастотную информацию и не учитывать незначительные перемещения частиц кварцевого песка под действием давления флюида (рис. 6, (4)). Далее производится операция бинаризации по пороговому значению. В данном методе создается матрица, представляющая собой бинарное изображение с объектом исследования, где: 1 – пиксель содержит объект, 0 – объект отсутствует (рис. 6, (5)).

На третьем этапе (рис. 5, (III)) производится расчет относительной насыщенности регистрируемой области. Относительная насыщенность вычислялась как отношение суммы матрицы бинарного изображения к общему количеству пикселей изображения.

Исследование процесса прохождения пузырька свободного газа через пористый материал

В ходе работы исследовалось прохождение пузырька газа через насыщенную песчаную среду, моделирующую донные отложения. В качестве модели среды использовался кварцевый песок с характерным размером частиц менее 0.2 мм. Образец исследуемой песчаной среды представлял собой плотную упаковку кварцевых зерен с пористостью порядка 0.35 и плотностью минерального скелета около 2700 кг/м³, что соответствует параметрам аналогичных сред, используемых при лабораторном моделировании фильтрационных процессов в гидратосодержащих породах [Chuvilin et al., 2022]. Суть опытов состояла в прокачке пузырька газа через образец с одновременной регистрацией изменения эффективной проницаемости и визуальной картины вытеснения, которая на стадии обработки данных конвертировалась в пространственное распределение газонасыщенности.

В начале каждого опыта пузырёк газа инжектировался в подводящий канал. После этого в гидроаккумуляторе на входе в модели создавалось начальное давление порядка 0.01 МПа, под действием которого пузырёк перемещался вместе с жидкостью и входил в поровое пространство. Прокачка жидкости продолжалась в течение получаса до полной остановки потока. За время одного испытания через образец суммарно проходило порядка 0.5 см³ жидкости. В конце каждого опыта производилось измерение нулевого значения датчика порового давления. Для этого открывался клапан, выравнивающий давление на концах модели. Фактически при этом происходило измерение небольшого гидростатического перепада давления между датчиком и свободным уровнем жидкости на весах при выходе из установки. В процессе обработки результатов опытов эта поправка вычиталась из показаний датчика порового давления.

Было проведено две серии опытов с различным объёмом пузыря газа V_{gas} : 0.01, 0.02 и 0.03 см³, что примерно соответствует 0.2, 0.4 и 0.6 от суммарного порового объёма V_{pore} образца (порядка 0.05 см³). В первой серии единичный пузырёк газа с различным объёмом прокачивался через образец, полностью насыщенный жидкостью. Для очищения порового пространства от остаточного газа между опытами производилась дополнительная прокачка жидкости (очищение контролировалось

визуально). Во второй серии опытов несколько пузырьков газа последовательно прокачивались через образец без этапа очищения, при этом каждый следующий пузырёк проходил через среду с остаточной газонасыщенностью.

Результаты

На рис. 7 показаны стадии прохождения пузырька газа через образец среды в одном из опытов. Данная картина типична для процесса вытеснения более вязкого флюида менее вязким. При входе в поровое пространство образуется канал («палец»), по которому происходит фильтрация газа. В момент выхода канала в заднюю границу образца наблюдается резкое увеличение регистрируемого расхода флюида. Большая часть газа проходит образец насквозь, при этом некоторое количество задерживается в поровом пространстве и формирует остаточную газонасыщенность.

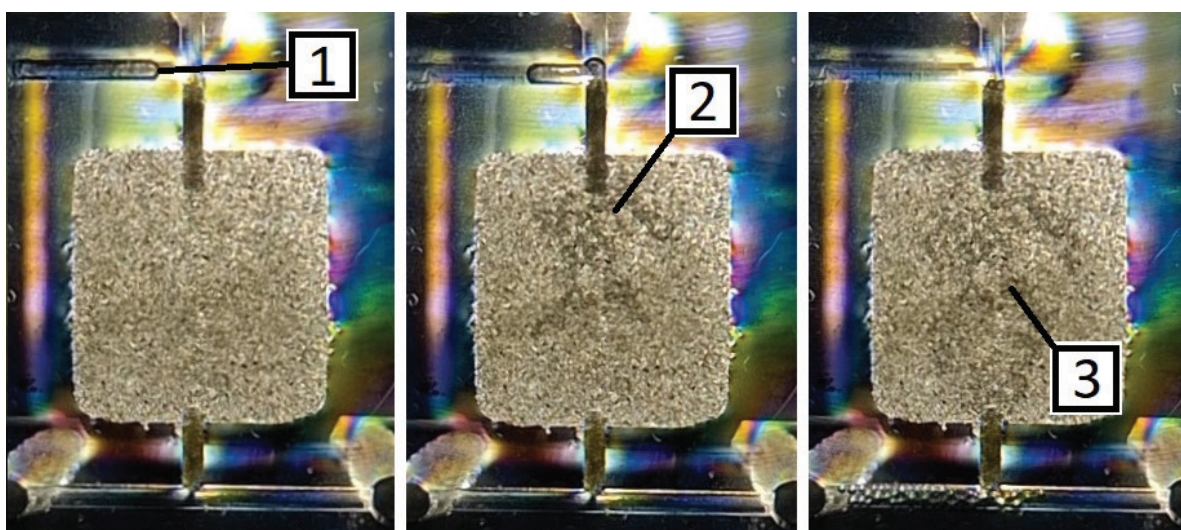


Рис. 7. Последовательные стадии прохождения пузырька газа через образец среды: 1 – пузырёк в подводящем канале, 2 – пузырёк проникает в поровое пространство, образуя «пальцы», 3 – остаточная газонасыщенность после прохождения пузырька

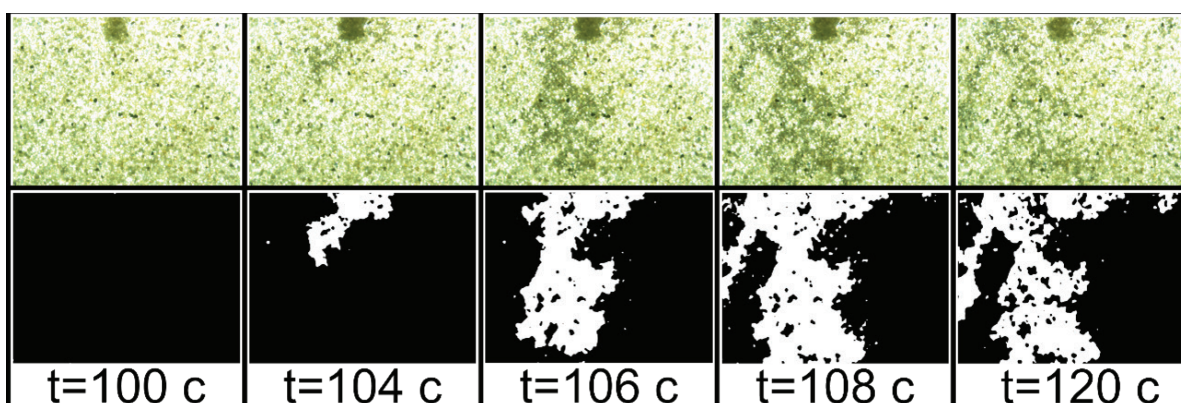


Рис. 8. Последовательные стадии прохождения пузырька газа через пористый материал. Сверху показаны исходные изображения, внизу – пространственное распределение газа, полученное в результате их обработки. Поток направлен сверху вниз

На рис. 8 показаны результаты обработки изображений, полученных в процессе прохождения пузырька. Отметка времени 108 с соответствует моменту максимальной газонасыщенности образца,

далее газонасыщенность снижается и после 110 с перестаёт меняться. Соответствующий график изменения газонасыщенности со временем, полученный по данным обработки изображений, представлен на рис. 9.

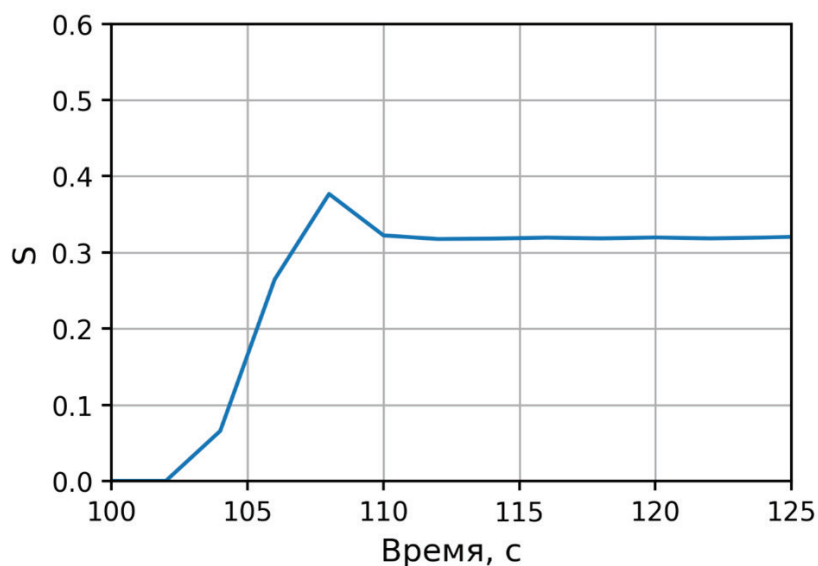
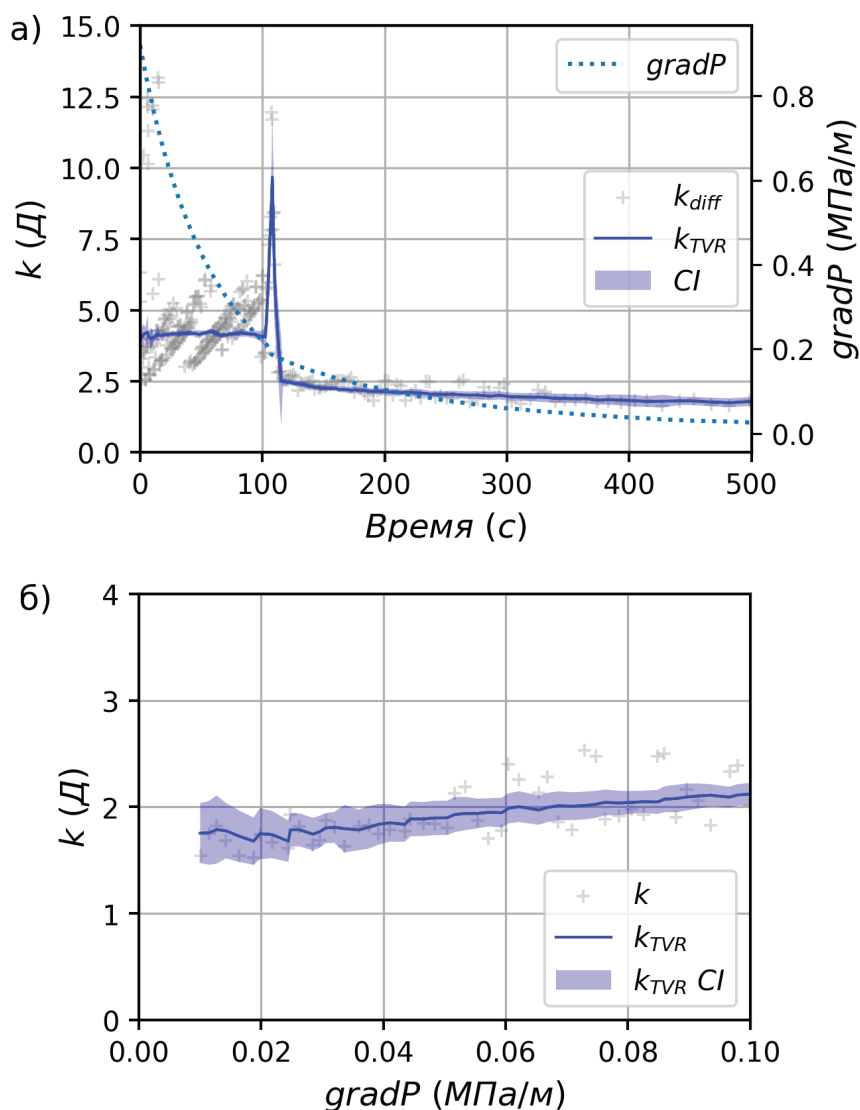


Рис. 9. График зависимости газонасыщенности от времени, полученный по данным обработки изображений

Рис. 10. Эффективная проницаемость образца в одном из опытов: а – зависимость эффективной проницаемости образца от времени: k – «сырые» данные, полученные по методу центральной разности вычисления производной массы жидкости на весах, k_{TVR} – сглаженная кривая, полученная с помощью регуляризации квадратичного отклонения, CI – оценка 95% доверительного интервала для k_{TVR} (пунктирной линией показана зависимость градиента порового давления от времени); б – та же кривая изменения эффективной проницаемости, отложенная относительно величины градиента давления



На рис. 10 представлен результат измерения эффективной проницаемости образца для того же опыта. На рис. 10а показана экспериментальная зависимость эффективной проницаемости k образца (образец № 2) от времени. Маркерами показаны «сырые» данные, вычисленные по методу центральной разности вычисления производной массы жидкости на весах. Сплошной линией и тоном обозначена та же кривая, полученная с помощью регуляризации квадратичного отклонения, а также оценка её 95% доверительного интервала. На отметке времени 100 с происходит резкое увеличение измеряемой эффективной проницаемости. Это связано с резким увеличением расхода флюида при прохождении газа через образовавшийся канал, после чего наблюдается падение эффективной проницаемости, объясняемое влиянием остаточной газонасыщенности. На рис. 10б показана та же зависимость, отложенная от величины градиента давления, изменение тех же величин от времени в процессе спада давления. Некоторое падение эффективной проницаемости со временем на рис. 10а (и с уменьшением градиента на рис. 10б) предположительно является следствием перераспределения остаточного газа в порах с образованием дополнительных менисков. Такое снижение регистрировалось в большинстве опытов.

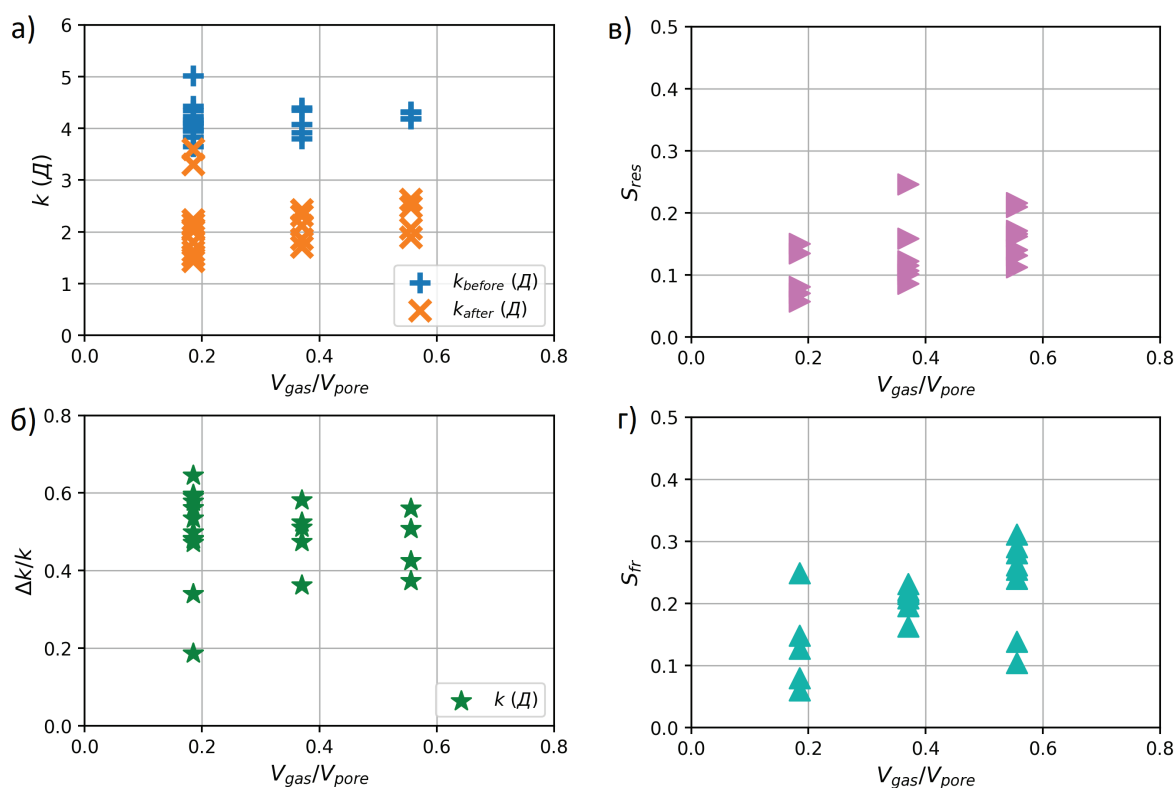


Рис. 11. Изменение эффективной проницаемости и газонасыщенности при прохождении пузырька газа через образец для серии опытов с различным начальным объёмом пузырька V_{gas} , выраженным в долях от суммарного объёма пор V_{pore} : а – эффективная проницаемость образца до и после прохождения пузырька, б – относительное падение величины проницаемости, в – остаточная газонасыщенность, г – пиковая (фронтальная) газонасыщенность

На рис. 11 показано изменение эффективной проницаемости и газонасыщенности в результате прохождения пузырька газа через образец для серии опытов с прокачкой единичного пузырька с различным объёмом V_{gas} , выраженным в долях от суммарного объёма пор V_{pore} . На рис. 11а разными маркерами показаны проницаемости до и сразу после прохождения пузырька, на рис. 11б – относительное изменение проницаемости. На рисунках 11в, г соответственно показаны величины остаточной газонасыщенности S_{res} и пиковой (фронтальной) газонасыщенности S_{fr} . Нам не удалось обнаружить явной зависимости падения эффективной проницаемости от начального объёма пузырька газа. Очевидно, что эффективная проницаемость после прохождения пузыря определяется остаточной

газонасыщенностью, которая не зависит от объёма прокачиваемого газа. В среднем пиковая газонасыщенность превышала остаточную на 0.05 (пиковая в среднем – 0.2, остаточная – 0.15).

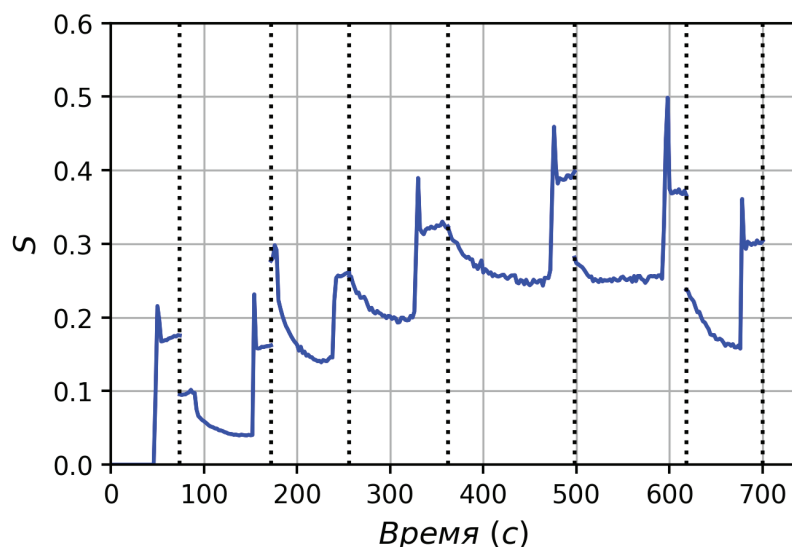


Рис. 12. Зависимость газонасыщенности от времени в серии опытов с последовательной прокачкой пузырька газа через образец. Вертикальным пунктиром обозначены отдельные опыты, шкала времени объединена

На рис. 12 показана зависимость газонасыщенности от времени в серии опытов с последовательной прокачкой пузырьков газа (каждый объёмом 0.01 см^3) через образец. Вертикальным пунктиром отделены участки графика, соответствующие отдельным опытам, каждый из участков повторяет характерный вид графика зависимости газонасыщенности от времени из опытов с одиночным пузырьком (рис. 9): пики на графике соответствуют моментам максимальной насыщенности при прохождении пузырька, далее идёт стадия спада и выравнивания до величины остаточной насыщенности. При прокачке первых 4-х пузырьков наблюдается постепенное увеличение как пиковой, так и остаточной газонасыщенности. Участки спада графика соответствуют «промыванию» порового пространства при прокачке жидкости без газа, предшествующей пузырьку. Начиная с 5-го пузырька, происходит некоторая стабилизация величин остаточной насыщенности в районе 0.25.

Обсуждение

Применение плоских, оптически прозрачных моделей существенно расширяет возможности стандартных методов при исследовании многофазных потоков в пористых средах, прежде всего благодаря возможности прямого визуального контроля распределения насыщенностей. Поскольку напряжённое состояние образца пористой среды не критично для изучения фазовых проницаемостей, отпадает необходимость в традиционных цилиндрических образцах. Плоские модели проще насыщать и контролировать на всех стадиях эксперимента. Однако практическая реализация таких моделей сопряжена с определенными трудностями. Изготовление достаточно тонкого среза породы, пригодного для просвечивания, представляет собой сложную техническую задачу, часто приводящую к изменению исходных свойств материала. Для сыпучих сред эта проблема менее актуальна, что делает предлагаемый метод привлекательной альтернативой традиционным исследованиям на спрессованных цилиндрических образцах. Несмотря на то, что размеры ячеек значительно меньше характерных природных масштабов, такая постановка эксперимента позволяет исследовать элементарные механизмы фильтрации и формирование каналов на уровне пор. Изученные закономерности – в частности, форма кривых относительных фазовых проницаемостей и характер образования проводящих путей – могут быть использованы в моделях макромасштаба.

При выполнении данной работы применение плоской модели позволило визуализировать процесс вхождения пузырька газа в среду, полноценно моделирующую свойства реальной среды. При этом

получены данные, позволяющие уточнить важные параметры модели двухфазной фильтрации, применяемой при крупномасштабном численном моделировании транспорта газа через толщу донных отложений, а именно величины фронтальной и остаточной газонасыщенности. В процессе образования проводящего канала насыщенность газовой фазы соответствует величине фронтальной насыщенности. Скорость фильтрации газа совпадает со скоростью образования канала. После того, как проводящий канал соединяется со стоком ячейки, поток газа резко возрастает, так как на него перестаёт оказывать влияние сила поверхностного натяжения на границе раздела. После того, как весь пузырёк проходит через образец, в поровом пространстве остаётся некоторое количество газа, формирующего остаточную газонасыщенность. Основным экспериментальным результатом работы состоит в том, что величина остаточной газонасыщенности в образце не зависела от объёма газа при прокачке единичного пузырька. В серии опытов с последовательной прокачкой нескольких пузырьков остаточная газонасыщенность увеличивалась при прокачке нескольких первых пузырьков, и затем стабилизировалась около величины 0.25. Несмотря на то, что полученные в опытах значения эффективной проницаемости (порядка нескольких Дарси) существенно превышают типичные для донных отложений, что связано с использованием чистого кварцевого песка сравнительно крупной фракции, наблюдаемые закономерности изменения проницаемости и газонасыщенности сохраняют качественную применимость для интерпретации процессов переноса газа в природных условиях, а сами результаты согласуются с данными исследования кривых относительных фазовых проницаемостей для аналогичной среды [Chuvilin et al., 2016]. Это даёт возможность использовать данную величину в качестве начальной газонасыщенности при проведении численного моделирования рассматриваемого процесса.

Выводы

Предложена методика, позволяющая проводить исследования двухфазных потоков в образцах сыпучей пористой среды с одновременным визуальным наблюдением за пространственным распределением фаз. Это достигается благодаря использованию тонкого, оптически прозрачного слоя пористой среды и методов цифровой обработки изображения. Проведена серия опытов с целью изучения закономерностей распределения фаз в процессе проникновения газа в насыщенную песчаную среду, моделирующую породы донных отложений, а также влияния газа на фильтрационные свойства среды. В ходе опытов через насыщенный модельный образец (кварцевый песок) пропусклся один или несколько пузырьков газа различного объёма (от 20 до 60% от суммарного порового объёма образца). В процессе прохождения пузырька газа через образец производилось измерение его эффективной проницаемости, а также регистрировалось пространственное распределение газонасыщенности в плоскости образца. Показано, что величина остаточной газонасыщенности в образце мало зависит от объёма газа при прокачке единичного пузырька. В серии опытов с последовательной прокачкой нескольких пузырьков остаточная газонасыщенность стабилизировалась на величине порядка 0.25. Существенного отклонения фильтрационных свойств модельного материала, частично заполненного газом, от линейных в ходе проведённых опытов обнаружено не было.

Полученные результаты позволяют выделить несколько характерных особенностей пузырькового переноса в насыщенной песчаной среде. В частности, показано, что формирование проводящего канала происходит при достижении определённой фронтальной газонасыщенности, а величина остаточной газонасыщенности слабо зависит от объёма единичного пузырька и стремится к устойчивому значению при последовательной прокачке газа. Несмотря на модельный характер выполненных лабораторных экспериментов, выявленные закономерности имеют прямую применимость к природным процессам, происходящим в слаболитифицированных песчаных отложениях Арктического шельфа.

Наблюдаемые формирование канала, характер газораспределения и стабилизация остаточной газонасыщенности могут использоваться для параметризации моделей пузырькового переноса и

уточнения характеристик двухфазной фильтрации в задачах крупномасштабного моделирования переноса свободного газа в естественных грунтовых средах.

Финансирование

Экспериментальная методика для исследования нелинейных фильтрационных свойств разработана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012100531-7). Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-67-00025).

Список литературы

- Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. Москва : Недра. 1984. – 211 с.
- Чувиллин Е.М., Гребенкин С.И., Жмаев М.В. Влияние гидрато- и льдообразования на газопроницаемость песчаных пород // Вести газовой науки. 2018. № 3 (35). С. 264–273. <https://www.elibrary.ru/yvrb1n>
- Baryshnikov N.A., Zenchenko E.V., Turuntayev S.B. Dependence of effective permeability on pore pressure gradient at low flow rates in low-permeability limestone // Interpretation. 2023. Vol. 11 (1). P. T1–T6. <https://doi.org/10.1190/INT-2021-0110.1>
- Baryshnikov N.A., Zenchenko P.E., Turuntaev S.B. Impact of gas arising from gas hydrate decomposition on the effective permeability of bottom sediments of the Arctic shelf: a laboratory simulation // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. 2024. Vol. 335 (6). P. 203–213. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/6/4422>
- Baryshnikov N.A., Zenchenko Ye.V., Turuntayev S.B. Nonlinear flow computation using total-variation regularization // Dynamic Processes in Geospheres. 2022. Vol. 14 (1). P. 85–92. https://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_85
- Boudreau B.P. The physics of bubbles in surficial, soft, cohesive sediments // Mar Pet Geol. 2012. Vol. 38 (1). P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.07.002>
- Chartrand R. Numerical Differentiation of Noisy, Nonsmooth Data // ISRN Applied Mathematics. 2011. P. 1–11. <https://doi.org/10.5402/2011/164564>
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I., Sacleux M. Influence of moisture content on permeability of sandy soils in frozen and unfrozen states // Earth's Cryosphere. 2016. Vol. 20 (3). P. 71–78. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3\(71-78\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3(71-78))
- Chuvilin E., Zhmaev M., Grebenkin S. Gas Permeability Behavior in Frozen Sand Controlled by Formation and Dissociation of Pore Gas Hydrates // Geosciences (Basel). 2022. Vol. 12 (9). P. 321. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090321>
- Gavrilov A. et al. Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf // Geosciences (Basel). 2020. Vol. 10 (12). P. 484.
- Liu H., Zhan L., Lu H. Mechanisms for upward migration of methane in marine sediments // Front Mar Sci. 2022. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1031096>
- Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // Geosciences (Basel). 2019. Vol. 9 (6). P. 251. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060251>
- Waite W.F., Santamarina J.C., Cortes D.D. et al. Physical properties of hydrate – bearing sediments // Reviews of Geophysics. 2009. Vol. 47 (4). P. RG4003. <https://doi.org/10.1029/2008RG000279>

EXPERIMENTAL MODELING OF FREE GAS BUBBLE TRANSPORT IN A WATER-SATURATED SANDY POROUS MEDIUM

© 2025 N. A. Baryshnikov*, P. E. Zenchenko, N. A. Yudochkin, E. V. Zenchenko

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: baryshnikov.na@idg.ras.ru*

This study presents the results of experimental modeling of free gas bubble transport in a water-saturated sandy porous medium. The main focus is on the development and validation of an original laboratory technique based on an optically transparent flat micromodel that enables visualization of gas saturation distribution through digital image processing. It is shown that when a gas bubble passes through the saturated sand sample, a conductive channel is formed, accompanied by a sharp increase in fluid flow, while residual gas saturation remains within the pore space. In single-bubble experiments, the residual gas saturation was independent of the bubble volume, whereas in sequential injections of multiple bubbles it stabilized at about 0.25. No significant deviations from linear filtration properties were observed. The obtained results are of methodological significance and can be used to refine the parameters of two-phase flow models applied to numerical simulations of gas transport in Arctic shelf sediments.

Keywords: porous medium, gas saturation, residual saturation, filtration properties, two-phase flow, flat micromodel, Arctic shelf, gas hydrates.