ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(3):119-129
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.02:539.2 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_119

МОДУЛЬНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАРОТАЖНЫЙ КОМПЛЕКС: КОНСТРУКЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СКВАЖИНЫ

А.А. Чумаков[1], П.В. Николенко[1], В.С. Гупало[2]

[1] НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: aachumakov@misis.ru
[2] ИБРАЭ РАН, Москва, Россия

Аннотация: Предложен ряд оригинальных конструктивных решений при изготовлении скважинного акустического зонда, направленных на повышение надежности и эффективности измерений. Реализована технология пневмоприжима; использован квазиточечный сухой акустический контакт на границе «преобразователь–порода» (в этом случае протектор имеет криволинейную поверхность, малый участок которого повторяет геометрию стенки скважины), что позволило достичь оптимальных (с точки зрения потерь энергии) условий ввода и приема ультразвуковых колебаний. Для проверки работоспособности аппаратурного комплекса изготовлена физическая модель скважины, содержащая участки ненарушенного массива, одиночные трещины и их системы. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что ультразвуковой каротаж с использованием сконструированного зонда позволяет стабильно выявлять как единичные, так и системы нарушений сплошности в породном массиве. Стабильное поведение скорости ультразвуковой волны в ненарушенном участке модели свидетельствует о том, что разработанный прижимной механизм и форма протектора пьезопреобразователя в процессе измерений обеспечивают единообразие контактных условий на всей протяженности скважины.

Ключевые слова: зонд, каротаж, ультразвук, контроль, трещиноватость, контактные условия, массив горных пород.

Для цитирования: *Чумаков А. А., Николенко П. В., Гупало В. С.* Модульный ультразвуковой каротажный комплекс: конструкция и результаты измерений на физической модели скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 119–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_119.

Modular ultrasonic logging system: Design and measurements in physical model of borehole

A.A. Chumakov[1], P.V. Nikolenko[1], V.S. Gupalo[2]

[1] NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: aachumakov@misis.ru
[2] Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences «IBRAE RAN», Moscow, Russia

Abstract: A series of the original constructional solutions proposed for the design of an acoustic borehole probe are aimed to improve efficiency and reliability of measurement. The design

© А.А. Чумаков, П.В. Николенко, В.С. Гупало. 2024.

implemented the technology of pneumatic hold-down and the quasi-point dry acoustic contact at the rock–transducer interface (in that case, the protector had a curved surface and a small area which repeated the borehole well geometry), which enabled optimum (in terms of energy loss) conditions for the inlet and intake of ultrasonic vibrations. For testing reliability of the hardware system, a physical model of a borehole was created, with intact areas, single cracks and crack systems. The experimental investigation has found out that ultrasonic logging with the designed probe allows stable detection of both single discontinuities and their systems in rocks. The stable behavior of the ultrasonic wave velocity in the intact rock area indicates that the developed hold-down mechanism and the shape of the protector of the piezoelectric transducer ensures uniform contact conditions along the whole length of boreholes in the course of measurements.

Key words: probe, logging, ultrasound, control, fracturing, contact conditions, rock mass.

For citation: Chumakov A. A., Nikolenko P. V., Gupalo V. S. Modular ultrasonic logging system: Design and measurements in physical model of borehole. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(3):119-129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_119.

Введение

Глубинное захоронение радиоактивных отходов предусматривает использование породного массива в качестве основного барьера на пути распространения радионуклидов. В мировой практике для создания таких объектов рассматриваются глины, а также скальные и соляные породы [1—4]. В РФ для создания пункта глубинного захоронения высокоактивных отходов выбраны слабонарушенные скальные породы. Основными достоинствами указанных пород при использовании их в качестве барьеров являются высокая прочность, низкая чувствительность к высоким температурам и низкая растворимость [5]. Также скальные породы на ненарушенных участках характеризуются низким коэффициентом фильтрации ($1–5\cdot10^{-4}$ м/сут) [6]. С другой стороны, скальные породы часто характеризуются наличием в них систем трещин, которые могут приводить к активному переносу подземных вод и выносу радионуклидов из области захоронения. Поэтому выявление трещинных систем в скальных породных массивах, рассматриваемых для глубинного захоронения радиоактивных отходов, и оценка степени нарушения ими изолирующих свойств пород является актуальной задачей.

Среди активных геофизических методов изучения скальных пород, позволяющих выделять трещиноватые зоны, а также количественно оценивать степень нарушенности массива, особое значение имеют акустические методы [7—16]. Последние связаны устойчивыми функциональными и корреляционными связями с важнейшими физическими свойствами, структурными особенностями и напряженно-деформированным состоянием горных пород. Среди акустических методов контроля особое место занимают ультразвуковые (УЗ), обладающие высокой разрешающей способностью, обусловленной использованием упругих колебаний на высоких (как правило, десятки и сотни килогерц) частотах [17]. В число основных задач ультразвуковых скважинных измерений обычно входит оценка параметров трещиноватости и пористости пород, их физических свойств, а также литологическое расчленение приконтурного массива [17—19].

Такие методы запланированы к применению при изучении структурного

строения и оценке пригодности скального породного массива, рассматриваемого для создания пункта глубинного захоронения на участке Енисейский в Красноярском крае.

Опыт натурных измерений показывает, что качество получаемой в результате каротажных измерений информации будет в значительной степени зависеть от соответствия условий производства работ параметрам измерительной аппаратуры, особенно от скважинной части каротажного комплекса [3]. В связи с тем, что в составе исследовательских работ на участке Енисейский предполагается использовать каротаж в скважинах различной ориентации — пробуренных в кровле, почве и боках выработки, — это исключает возможность применения стандартного оборудования и методик обработки, предполагающих проведение измерений в водозаполненных вертикальных скважинах, обеспечивающих постоянство контактных условий между излучателями/приемниками и массивом горных пород.

В соответствии с этим целью работы являлось создание акустического каротажного зонда, подходящего для проведения исследований массива горных пород в горизонтальных неводозаполненных скважинах в условиях пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО).

При этом особое внимание должно быть уделено разработке узлов передачи энергии колебаний на границе «преобразователь-порода», а также созданию надежной системы прижима преобразователей, обеспечивающей высокую повторяемость условий прижима и исключающей возможность заклинивания зонда в скважине.

Работоспособность и эффективность рассматриваемых решений предлагается продемонстрировать на физической модели скважины.

Разработка конструкции ультразвукового каротажного комплекса

Конструкция зонда представляет собой модульную систему, состоящую из трех отдельных модулей, каждый из которых содержит акустический преобразователь, пневматическое прижимное устройство и интерфейсы для соединения с другими подобными модулями. Все вместе они формируют скважинный зонд, в котором в зависимости от задач можно использовать два или более акустических преобразователя, а также изменять расстояние между ними путем установки различных по длине акустических развязок. Для создания условия повторяемости ввода акустических колебаний в исследуемую среду, а также их приема и регистрации был применен особый протектор преобразователя. В практике ультразвуковых измерений для прямых преобразователей используется два типа протекторов — плоские, изготовленные из оргстекла, керамики или металла, и точечные, изготавливаемые, как правило, из керамики. Первый тип преобразователя обеспечивает низкие потери энергии вводимого в объект контроля акустического сигнала из-за высокой площади контакта на границе «протектор-объект контроля» и обязательного применения специальных контактных жидкостей. Кроме того, в соответствии с ГОСТ Р55724-2013 шероховатость поверхности должна быть не хуже R_z = 40 мкм. Очевидно, что в условиях скважинных измерений использование контактных жидкостей, а также абразивная подготовка поверхности невозможна.

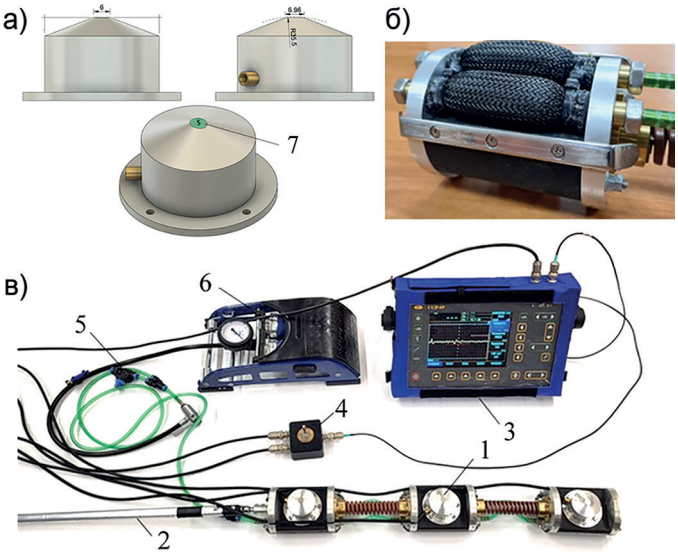
Более того, неизбежные неровности стенки скважины будут приводить к непостоянству контактных условий при сухом контакте преобразователей с большой площадью соприкосновения с породой. В известной степени этой проб-

лемы лишены преобразователи с сухим точечным контактом. Однако уменьшение площади контакта фактически до одной точки приводит к значительным потерям энергии вводимого в среду УЗ-импульса.

В конструкции протекторов преобразователей разработанного зонда применена технология квазиточечного контакта. В этом случае протектор имеет криволинейную поверхность, малый участок которой повторяет геометрию стенки скважины. Площадь контакта составляет $S \approx 28$ мм^2. При этом достигаются оптимальные (с точки зрения потерь энергии) условия ввода и приема ультразвуковых колебаний. Форма протектора преобразователя проиллюстрирована на рис. 1, *а*.

С целью обеспечения постоянства прижима в конструкции разработанного зонда применена специальная технология пневмоприжима, основанная на применении так называемых искусственных пневматических мышц [20, 21]. Они представляют собой устройства, состоящие из эластичной трубки (в данном случае термопластичной резины) и оплетки из нерастяжимых полиэстровых нитей. При подаче давления в трубку происходит сокращение ее длины с одновременным увеличением диаметра. Принцип работы прижимного устройства зонда поясняет рис. 1, *б*.

Предлагаемое техническое решение обладает рядом преимуществ: ремонтопригодность в полевых условиях; минимальное количество движущихся частей исключает возможность заклинивания зонда после сброса давления в системе; оплетка физически ограничивает расширение эластичной трубки, поэтому даже при увеличении давления в системе выше 3 атм давление прижи-



1 – ультразвуковой каротажный зонд; 2 – досылочная штанга;
3 – дефектоскоп УСД-60Н; 4 – коммутатор; 5 – воздушный клапан; 6 – пневматический насос;
7 – пятно контакта преобразователя со стенкой скважины

Рис. 1. Форма протектора акустического преобразователя (а), система пневмоприжима (б) и общий состав каротажного комплекса (в)

Fig. 1. Shape of the acoustic transducer protector (a), pneumatic clamping system (b) and general configuration of the logging complex (v)

ма преобразователя на стенку скважины изменяться не будет.

Разработанный скважинный зонд предназначен для работы в составе каротажного комплекса, состоящего из самого зонда, низкочастотного ультразвукового дефектоскопа УСД-60Н, пневматического насоса, коммутатора, а также вспомогательного оборудования (комплекта досылочных штанг). Общий вид разработанного каротажного комплекса представлен на рис. 1, *в*.

Проверка работоспособности каротажного комплекса на физической модели скважины

В соответствии с [22] для проверки работоспособности зонда выполнена серия экспериментов на созданной физической модели. Последняя отражала строение горизонтальной скважины с диаметром 76 мм, принятым для бурения в выработках ПИЛ. В задачи физического моделирования входило:

- общая проверка работоспособности зонда;
- оценка эффективности применения технологии квазиточечного контакта в форме протектора преобразователей;
- оценка эффективности пневматической системы прижима преобразователей.

Модель скважины представляла собой цилиндр, изготовленный из модельного материала (песчано-цементной смеси), с оборудованной в нем измерительной скважиной (рис. 2, *а*).

Каротажные измерения характеризуются изучением приповерхностного слоя пород в скважине. Большая часть энергии УЗ-колебаний сконцентрирована в слое пород вокруг скважины, сопоставимом с длиной волны. Исходя из резонансной частоты преобразователей ($f_р$ = = 80 кГц) и скорости продольной волны в модельном материале $V_р$ ≈ 3250 м/с, длина волны составляет λ = 41 мм. Толщина «породного» слоя в прискважинной области физической модели составляла 60 мм.

Диаметр внутреннего отверстия модели был выбран равным 76 мм, что соответствует планируемому диаметру бурения скважин в исследовательских выработках. Длина физической модели скважины была выбрана равной 1500 мм. Это позволило при длине зонда, равной 520 мм, провести серию экспериментов с различными условиями, такими как

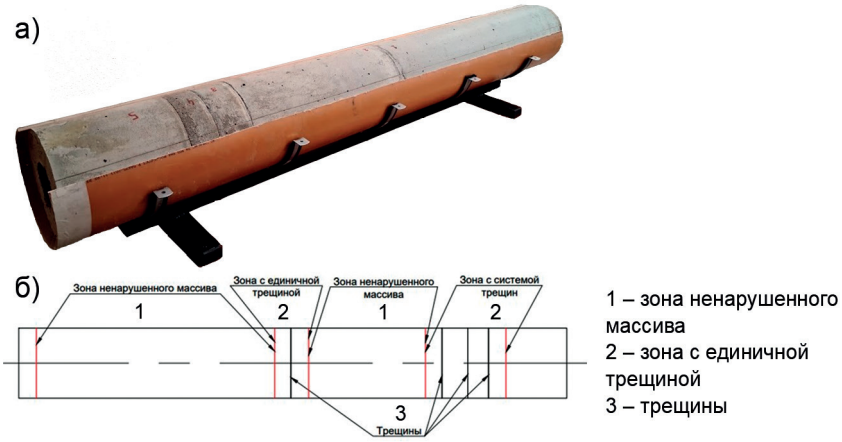


Рис. 2. Физическая модель скважины: фото (а); схематическое изображение (б)
Fig. 2. Physical model of the well: photo (a); schematic image (b)

однородный массив без нарушений; массив с единичной трещиной; массив с системой трещин.

Для моделирования неоднородностей физическая модель была условно поделена на три участка, как это показано на рис. 2, *б*:

- зона ненарушенного массива;
- зона с единичной трещиной;
- зона с системой трещин, 3 трещины.

В качестве нарушений были созданы магистральные трещины, пересекающие скважину и разделяющие модель на различные блоки. Всего моделировалось четыре трещины, одна из которых находится на достаточном удалении от трех остальных. Таким образом, выявлению подлежала единичная трещина и система трещин. Местоположение единичной трещины выбиралось исходя из конструкции зонда, а именно расстояния между излучателем и приемником, так чтобы одновременно между датчиками находилась только одна эта трещина, что позволяет смоделировать нахождение единичного нарушения, пересекающего ось скважины в массиве горных пород ПИЛ. Расстояние между тремя остальными трещинами выбиралось также исходя из расстояния между излучателем и приемником сигнала, так чтобы одновременно все три трещины могли находиться на пути прохождения ультразвукового сигнала.

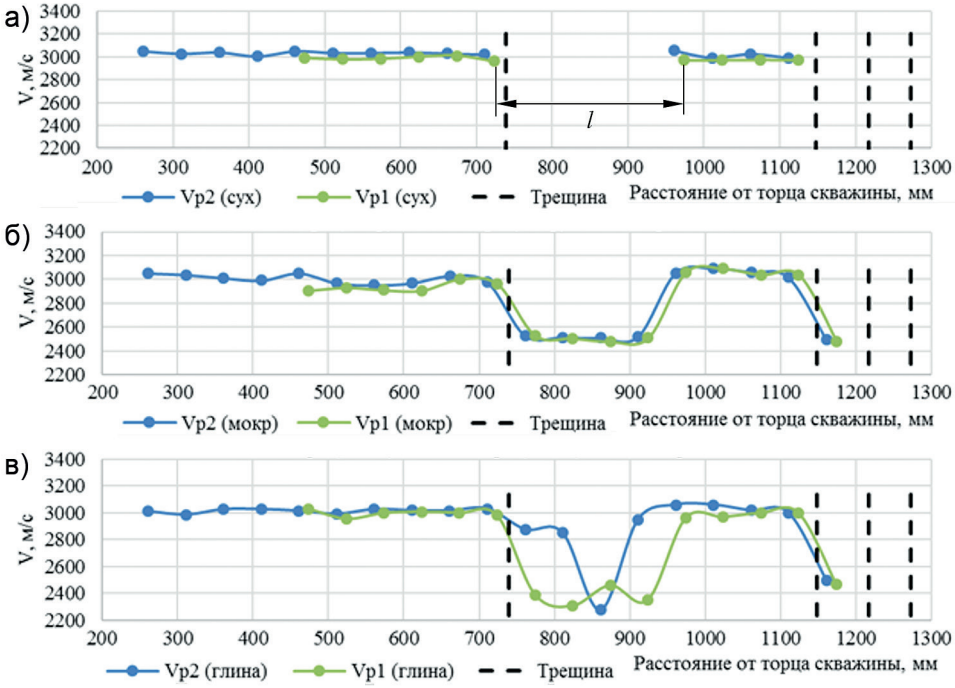
В качестве заполнителя трещин в реальных условиях могут выступать воздух, вода, а также горные породы различной степени нарушенности [5, 6]. В физической модели для этих целей использовались вода и глина (V_p = = 1500 м/с, ρ = 2200 кг/м^3, слой 2 мм).

Измерения производились в три этапа в зависимости от типа заполнителя трещин: этап I — воздухозаполненные трещины; этап II — трещины заполнены водой; этап III — трещины заполнены глиной. Каротажные диаграммы для каждого из типов заполнителя, построенные в ходе испытаний, приведены на рис. 3.

Результаты каротажа модельной скважины с трещинами без заполнителя

Из рис. 3, *а* видно, что на бездефектном участке V_p изменяется слабо вблизи значений 3150 м/с (коэффициент вариации v = 0,92) до отметки 724 мм, что свидетельствует о достаточном постоянстве контактных условий на границе «преобразователь-массив» (предполагается, что модельный материал не меняет своих акустических свойств вдоль оси скважины). Далее каротажная кривая разрывается. Это связано с невозможностью выделения первого вступления продольной волны на фоне потерь энергии на воздухозаполненной трещине. Разрыв продолжается до отметки 950 мм, где значения V_p восстанавливаются до исходных. Положение трещины в данном случае можно определить с абсолютной погрешностью, равной шагу измерений вдоль оси скважины по координате точки, после которой начинается разрыв каротажной кривой. В данном случае погрешность определения координаты составила 50 мм.

Второй разрыв каротажной диаграммы наблюдается после отметки 1120 мм, когда каротажный зонд входит в область системы трещин. В данном случае принципиального отличия от единичной трещины не выявляется, так как и в этом случае выделение первого вступления продольной волны оказывается невозможным. С точки зрения разделения единичной трещины и системы трещин единственным различием будет протяженность зоны разрыва — для единичной трещины она будет равна базе прозвучивания l, а для системы трещин $l + x$, где x — расстояние между крайними трещинами в системе.



l – база прозвучивания

Рис. 3. Каротажные диаграммы, полученные на этапе I (а), этапе II (б) и этапе III (в)
Fig. 3. Logging diagrams obtained at the stage I (a), the stage II (b) and stage III (v)

Результаты каротажа модельной скважины с заполнением трещин водой

Как видно из рис. 3, *а*, *б*, основным отличием полученных каротажных диаграмм можно считать отсутствие разрывов кривых в зонах нахождения трещин. В указанных зонах наблюдается резкое падение значений V_p более чем на 30%. Такое падение не может быть обусловлено исключительно локальным снижением V_p в водяной прослойке трещины. Скорость в воде значительно меньше, чем в бетоне и горных породах (≈1300 м/с), однако малое раскрытие трещины (менее 1 мм) приводит к тому, что вклад подобной неоднородности в изменение скорости продольной волны должен измеряться единицами процентов, а не десятками. Причиной этому является то, что общее время прохождения упругой волны по двум средам складывается из суммы времен прохождения в каждой среде по отдельности, при базе прозвучивания, равной 200 мм, и прослойке воды толщиной 1 мм на песчано-гравийную смесь приходится 63,5 мкс, а на заполненную водой трещину 0,8 мкс, что на два порядка меньше, чем в основной среде. В данном случае механизм снижения V_p в зоне нахождения трещины, вероятнее всего, носит комплексный характер.

С одной стороны, происходит естественное увеличение времени распространения продольной волны из-за нахождения на ее пути зоны, характеризующейся более низкими значениями скорости.

С другой стороны, контраст акустических импедансов на берегах трещины довольно высок ($z_{бетона}/z_{воды} \approx 5$), в свя-

зи с чем значительная часть энергии УЗ-колебаний теряется из-за процессов отражения на границах «бетон–вода» и «вода–бетон». Вероятнее всего, в данном случае это привело к снижению амплитуды первого вступления продольной волны ниже уровня шума, а значения V_p были определены по второму периоду волновой формы.

Результаты каротажа модельной скважины с заполнением трещин глиной

Полученные в результате проведения каротажа данные с глиной в качестве заполнителя трещин в целом соответствуют данным, полученным на трещинах, заполненных водой (рис. 3, *в*). В случае заполнения трещин глиной падение значений V_p оказывается хоть и менее контрастным, но все еще весьма значительным. Очевидно, в данном случае также может проявляться эффект потери первого вступления, особенно это справедливо для сигналов, проходящих через систему трещин. Существенного влияния типа заполнителя трещины на определение ее координаты не наблюдается, так как во всех рассмотренных случаях при нахождении трещины на базе прозвучивания регистрируемые УЗ-импульсы претерпевают значительные изменения.

Также следует отметить малую информативную ценность положения максимума спектра. Действительно, основное влияние на этот параметр оказывает резонансная частота используемых преобразователей. Изменения спектрального состава УЗ-импульсов при их прохождении через трещины может проявляться в виде снижения амплитуд высокочастотных компонент спектра. Однако в случае вынужденного использования сухого контакта на границе «преобразователь–порода» даже незначительные изменения в давлении прижима или шероховатости поверхности могут приводить к существенным изменениям спектрального состава УЗ-колебаний [23].

Линейность всех каротажных диаграмм на участке до 700 мм указывает на постоянство контактных условий, обеспечиваемых разработанной системой прижима. Устойчивое получение ультразвукового сигнала, прошедшего через трещины, заполненные водой или глиной, указывает на эффективность использования квазиточечного контакта на границе «преобразователь–массив».

Заключение

В работе описывается конструкция нового ультразвукового каротажного комплекса. Основой комплекса является скважинный зонд, построенный на модульной архитектуре, позволяющей быстро изменять количество акустических преобразователей, а также расстояние между ними. Основное назначение зонда — проведение ультразвуковых измерений в неводозаполненных скважинах, пробуренных в скальном массиве пород. Высокая эффективность измерений достигается за счет применения ряда новых технических решений (оригинальной системы пневмоприжима, квазиточечного контакта на границе «преобразователь-порода»). Надежность получаемых результатов продемонстрирована при испытаниях каротажного комплекса на физической модели скважины, содержащей трещины с различными типами заполнения.

В возможности комплекса входит измерение амплитуд и времен первого вступления продольных и поперечных волн с последующей возможностью выделения участков пород, содержащих трещины, а также оценка динамических упругих констант в прискважинной области массива. Комплекс отличается универсальностью и адаптивностью и может быть использован для решения широкого круга задач геоконтроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schuster K., Furche M., Shao H., Hesser J., Hertzsch J.-M., Gräsle W., Rebscher D.* Understanding the evolution of nuclear waste repositories by performing appropriate experiments — selected investigations at Mont Terri rock laboratory // Advances in Geosciences. 2019, vol. 49, pp. 175—186. DOI: 10.5194/adgeo-49-175-2019.

2. *Kim J. S.*, *Kwon S. K.*, *Sanchez M.*, *Cho G. C.* Geological storage of high level nuclear waste // KSCE Journal of Civil Engineering. 2011, vol. 15, pp. 721—737. DOI: 10.1007/s12205-011-0012-8.

3. *Bossart P., Bernier F., Birkholzer J., Bruggerman C., Connoly P., Dewonck S., Fukaya M., Herfort M., Jensen M., Matray J., Mayor J., Moeri A., Oyama T., Schuster K., Shigeta N., Vietor T., Wieczorek K.* Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments // Swiss Journal of Geosciences. 2017, vol. 110, pp. 3—22. DOI: 10.1007/s00015-016-0236-1.

4. *Морозов О. А.*, *Расторгуев А. В.*, *Неуважаев Г. Д.* Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 4(9). — С. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

5. *Савельева Е. А.* Международная кооперация по геологическому захоронению РАО в кристаллических горных породах (Кристаллический клуб) // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 2(7). — С. 58—64. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-58-64.

6. *Румынин В. Г.* Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // Радиоактивные отходы. — 2017. — № 1(1). — С. 44—55.

7. *Жуков В. С.*, *Кузьмин Ю. О.* Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // Физика Земли. — 2020. — № 4. — С. 39—50. DOI: 10.31857/S0002333720040109.

8. *Кузнецов Ю. И.* Акустический каротаж как возможный метод исследования трещиноватости горных пород // Каротажник. — 2017. — № 2(272). — С. 95—107.

9. *Аверин А. П.* Исследование параметров затухания при ультразвуковых наблюдениях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 10. — С. 66—70.

10. *Долгирев С. С.*, *Кириченко Ю. В.* Новые подходы к расчету проницаемости трещинных зон и коллекторов трещинно-кавернозного типа // Каротажник. — 2018. — № 6(288). — С. 85—93.

11. *Schuster K., Amann F., Yong S., Bossart P., Connolly P.* High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory / Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years. 2017, pp. 215—233. DOI: 10.1007/978-3-319-70458-6_11.

12. *Schuster K.* Mini-Seismic Methods for the in-situ characterization of clay rocks — Examples from URL Meuse/Haute-Marne (France) and HADES URF (Belgium) // Geomechanics for Energy and the Environment. 2019, vol. 17, pp. 16—28. DOI: 10.1016/j.gete.2018.09.005.

13. *Баюк И. О.*, *Рыжков В. И.* Определение параметров трещин и пор карбонатных коллекторов по данным волнового акустического каротажа // Технологии сейсморазведки. — 2010. — № 3. — С. 32—42.

14. *Гик Л. Д.* Методы изучения трещин и пор горных пород на основе данных акустического каротажа // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 4. — С. 67—73.

15. *Захаров В. Н.*, *Аверин А. П.* Механизмы затухания волновых процессов при ультразвуковых наблюдениях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2005. — № 7. — С. 95—100.

16. *Савич А. И.*, *Коптев В. И.*, *Никитин В. Н.*, *Ященко З. Г.* Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. — М.: Недра, 1969. — 239 с.

17. *Gubaidullin A. A.*, *Boldyreva O. Y.*, *Dudko D. N.* Velocity and attenuation of linear waves in porous media saturated with gas and its hydrate // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2022, vol. 63, pp. 599—605. DOI: 10.1134/S002189442204006X.

18. *Voznesenskii A. S.*, *Krasilov M. N.*, *Kutkin Y. O.*, *Tavostin M. N.* Reliability increasing of an estimation of rocks strength by non-destructive methods of acoustic testing due to additional informative parameters // The Minerals, Metals & Materials Series. 2019, pp. 411—423. DOI: 10.1007/978-3-030-05749-7_41.

19. *Nikolenko P. V.*, *Zaitsev M. G.* Effect of discontinuities on elastic wave velocities in high-stress rock samples: Experimental research using ultrasonic interferometry // Journal of Mining Science. 2022, vol. 58, pp. 936—944. DOI: 10.1134/S1062739122060084.

20. *Chou C.-P., Hannaford B.* Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1996, vol. 12, no. 1, pp. 90—102. DOI: 10.1109/70.481753.

21. *Soleymani R., Khajehsaeid H.* A mechanical model for McKibben pneumatic artificial muscles based on limiting chain extensibility and 3D application of the network alteration theories // International Journal of Solids and Structures. 2020, vol. 202, pp. 620—630. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.06.036.

22. *Tianyang Li, Zizhen Wang, Yu Jeffrey Gu, Ruihe Wang, Yuzhong Wang* Experimental study of fracture structure effects on acoustic logging data using a synthetic borehole model // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019, vol. 183, article 106433. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106433.

23. *Николенко П. В., Зайцев М. Г.* Оценка шероховатости поверхности и идентификация типа горных пород ультразвуковыми и оптическими методами // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 3. — С. 5—15. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_5. ГИАБ

REFERENCES

1. Schuster K., Furche M., Shao H., Hesser J., Hertzsch J.-M., Gräsle W., Rebscher D. Understanding the evolution of nuclear waste repositories by performing appropriate experiments — selected investigations at Mont Terri rock laboratory. *Advances in Geosciences*. 2019, vol. 49, pp. 175—186. DOI: 10.5194/adgeo-49-175-2019.

2. Kim J. S., Kwon S. K., Sanchez M., Cho G. C. Geological storage of high level nuclear waste. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2011, vol. 15, pp. 721—737. DOI: 10.1007/s12205-011-0012-8.

3. Bossart P., Bernier F., Birkholzer J., Bruggerman C., Connoly P., Dewonck S., Fukaya M., Herfort M., Jensen M., Matray J., Mayor J., Moeri A., Oyama T., Schuster K., Shigeta N., Vietor T., Wieczorek K. Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments. *Swiss Journal of Geosciences*. 2017, vol. 110, pp. 3—22. DOI: 10.1007/s00015-016-0236-1.

4. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Assessing the State of the Geological Environment at the Yeniseyskiy Site (Krasnoyarsk Region). *Radioactive waste*. 2019, no. 4(9), pp. 46—62. [In Russ]. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

5. Saveleva E. A. International cooperation in radioactive waste disposal in crystalline rocks (crystalline club). *Radioactive waste*. 2019, no. 2(7), pp. 58—64. [In Russ]. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-58-64.

6. Rumynin V. G. Experience of studying the clay masses and crystalline core-areas as geological environment for RW final isolation. *Radioactive waste*. 2017, no. 1(1), pp. 44—55. [In Russ].

7. Zhukov V. S., Kuzmin Y. O. The influence of fracturing of the rocks and model materials on P-wave propagation velocity: Experimental studies. *Fizika Zemli*. 2020, no. 4, pp. 39—50. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0002333720040109.

8. Kuznetsov Yu. I. Acoustic logging as a possible method for studying rock fracturing. *Karotazhnik*. 2017, no. 2(272), pp. 95—107. [In Russ].

9. Averin A. P. Investigation of attenuation parameters during ultrasound observations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2004, no. 10, pp. 66—70. [In Russ].

10. Dolgirev S. S., Kirichenko YU. V. New approaches to calculating the permeability of fractured zones and reservoirs of the fractured-cavernous type. *Karotazhnik*. 2018, no. 6(288), pp. 85—93. [In Russ].

11. Schuster K., Amann F., Yong S., Bossart P., Connolly P. High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory. *Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years*. 2017, pp. 215—233. DOI: 10.1007/978-3-319-70458-6_11.

12. Schuster K. Mini-Seismic Methods for the in-situ characterization of clay rocks — Examples from URL Meuse/Haute-Marne (France) and HADES URF (Belgium). *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2019, vol. 17, pp. 16—28. DOI: 10.1016/j.gete.2018.09.005.

13. Bayuk I. O., Ryzhkov V. I. Determination of the parameters of cracks and pores of carbonate reservoirs according to wave acoustic logging. *Seismic technologies*. 2010, no. 3, pp. 32—42. [In Russ].

14. Gik L. D. Methods for studying cracks and pores of rocks based on acoustic logging data. *Physical Mesomechanics*. 2008, vol. 11, no. 4, pp. 67—73. [In Russ].

15. Zaharov V. N., Averin A. P. Mechanisms of attenuation of wave processes in ultrasonic observations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2005, no. 7, pp. 95—100. [In Russ].

16. Savich A. I., Koptev V. I., Nikitin V. N., YAshchenko Z. G. *Seysmoakusticheskie metody izucheniya massivov skal'nykh porod* [Seismoacoustic methods for studying rock massifs], Moscow, Nedra, 1969, 239 p.

17. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Y., Dudko D. N. Velocity and attenuation of linear waves in porous media saturated with gas and its hydrate. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2022, vol. 63, pp. 599 — 605. DOI: 10.1134/S002189442204006X.

18. Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Y. O., Tavostin M. N. Reliability increasing of an estimation of rocks strength by non-destructive methods of acoustic testing due to additional informative parameters. *The Minerals, Metals & Materials Series*. 2019, pp. 411 — 423. DOI: 10.1007/978-3-030-05749-7_41.

19. Nikolenko P. V., Zaitsev M. G. Effect of discontinuities on elastic wave velocities in high-stress rock samples: Experimental research using ultrasonic interferometry. *Journal of Mining Science.* 2022, vol. 58, pp. 936 — 944. DOI: 10.1134/S1062739122060084.

20. Chou C.-P., Hannaford B. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1996, vol. 12, no. 1, pp. 90 — 102. DOI: 10.1109/70.481753.

21. Soleymani R., Khajehsaeid H. A mechanical model for McKibben pneumatic artificial muscles based on limiting chain extensibility and 3D application of the network alteration theories. *International Journal of Solids and Structures*. 2020, vol. 202, pp. 620 — 630. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.06.036.

22. Tianyang Li, Zizhen Wang, Yu Jeffrey Gu, Ruihe Wang, Yuzhong Wang Experimental study of fracture structure effects on acoustic logging data using a synthetic borehole model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, vol. 183, article 106433. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106433.

23. Nikolenko P. V., Zaitsev M. G. Surface roughness estimation and rock type identification by ultrasonic and optical techniques. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 5 — 15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чумаков Андрей Александрович[1] — аспирант,
e-mail: aachumakov@misis.ru,
ORCID ID: 0009-0006-3697-3527,
Николенко Петр Владимирович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: p.nikolenko@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5126-6576,
Гупало Владимир Сергеевич — докт. техн. наук,
зав. лабораторией, ИБРАЭ РАН, e-mail: gupalo@ibrae.ac.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2228-1275,
[1] НИТУ МИСИС.
Для контактов: Чумаков А.А., e-mail: aachumakov@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Chumakov[1], Graduate Student,
e-mail: aachumakov@misis.ru,
ORCID ID: 0009-0006-3697-3527,
P.V. Nikolenko[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: p.nikolenko@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5126-6576,
V.S. Gupalo, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,
Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences
«IBRAE RAN», 115191, Moscow, Russia,
e-mail: gupalo@ibrae.ac.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2228-1275,
[1] NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.A. Chumakov, e-mail: aachumakov@misis.ru.

Получена редакцией 22.08.2023; получена после рецензии 25.01.2024; принята к печати 10.02.2024.
Received by the editors 22.08.2023; received after the review 25.01.2024; accepted for printing 10.02.2024.