



## СВЯЗЬ ТЕПЛОВЫХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНИКА

Т.Р. Ялаев<sup>1</sup>, И.О. Баюк<sup>2</sup>, Н.Ф. Тарелко<sup>3</sup>, В.В. Абашкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9, Россия, e-mail: tagirjala@mail.ru

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
123242, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, Россия, e-mail: ibayuk@yandex.ru

<sup>3</sup>Московский научно-исследовательский центр Шлюмберже,  
119285, г. Москва, ул. Пудовкина, 13, Россия, e-mail: ntarelko@slb.com, vabashkin@slb.com

Статья посвящена построению связи эффективных тепловых и упругих свойств на примере терригенного коллектора – песчаника Бентхаймер. С этой целью на основе теории эффективных сред была построена параметрическая математическая модель эффективных физических свойств песчаника Бентхаймер. Продемонстрирована связь динамических упругих свойств породы и теплопроводности как для сухих, так и для флюидонасыщенных образцов. Для воссоздания пластовых условий проведены испытания образцов песчаника при осевой нагрузке до 21 МПа. На основе построенной модели сделан прогноз изменения упругих свойств образца в процессе его нагружения по измерениям теплопроводности в этом опыте. Показано изменение параметров модели, описывающих внутреннюю структуру образцов, в зависимости от приложенной осевой нагрузки.

*Теплопроводность, эффективные упругие свойства, терригенный тип пород, теория эффективных сред*

## CONNECTION BETWEEN THERMAL AND ELASTIC PROPERTIES OF BENTHEIMER SANDSTONE

T.R. Yalaev<sup>1</sup>, I.O. Bayuk<sup>2</sup>, N.F. Tarelko<sup>3</sup>, V.V. Abashkin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
Institutskiy per., 9, Moscow oblast, Dolgoprudny, 141700, Russia, e-mail: tagirjala@mail.ru

<sup>2</sup>Institute of Physics of the Earth, RAS,  
B. Gruzinskaya st., 10, build. 1, Moscow, 123242, Russia, e-mail: ibayuk@yandex.ru

<sup>3</sup>Schlumberger Moscow Research Center,  
Pudovkina st., 13, Moscow, 119285, Russia, e-mail: ntarelko@slb.com, vabashkin@slb.com

The paper addresses the relation between the effective thermal and elastic properties. As an example of such a relation the Bentheimer sandstone is used. To achieve this goal, the effective medium theory is used to create a mathematical model of the effective physical properties of the sandstone. A relation between the dynamic elastic properties and thermal conductivity of dry and fluid-saturated core samples has been demonstrated. To mimic the in situ conditions the samples were uniaxially loaded up to the 21 MPa. Based on the created model a change in elastic properties has been predicted from the thermal conductivity measurements in the same experiment. The model parameters change due to applied load is shown.

*Thermal conductivity, effective elastic properties, terrigenous sandstone, effective medium theory*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительную долю среди технологий повышения нефтеотдачи пластов составляют тепловые методы и методы заводнения пластов. С учетом увеличения объемов добычи высоковязких и парафинистых нефтей и природных битумов эта доля с каждым годом будет только расти. Для более эффективного использования ресурсов на практике используются программы-симуляторы, моделирующие процессы тепло- и массопереноса. Для построения таких моделей необходимо задавать тепловые свойства пород-коллекторов, включая теплопроводность [Chekhonin et al., 2012].

Измерение теплопроводности не входит в список стандартных измерений анализа керна [American..., 1998]. В этой связи становятся актуальными теоретические подходы к оценке эффективных физических свойств пород, в том числе и теплопроводности. Такие

подходы можно условно разделить на пять групп: эмпирические [Sugawara, Yoshizawa 1961, 1962; Hartmann et al., 2005], инженерные [Lichtenecker, Rother, 1931; Gueguen, Dienes 1989], нейронные сети [Zhang, Friedrich, 2003], численное моделирование [Walls, Sinclair, 2011; Andrä et al., 2013], методы теории эффективных сред [Баюк, 2013; Jacobsen et al., 1987; Choy, 2015].

Эмпирические подходы не могут быть применимы для широкого класса объектов. Подавляющее большинство установленных зависимостей применимы только для одного типа пород, в определенном диапазоне фильтрационно-емкостных характеристик, физических свойств пород, минерального состава. Отдельно отметим, что в рамках данного подхода не существует строгого правила, позволяющего определить применимость конкретной эмпирической зависимости к изучаемому набору данных.

Инженерные подходы удобны в применении, так как в отличие от эмпирических моделей не требуют большого объема экспериментальных данных. Широкое применение этих подходов стало возможным в связи с установлением границ для параметров, характеризующих физические свойства микронеоднородных сред (так называемые “вилки” Фойгта-Ройсса, Винера и т. д.). Если границы известны, то в качестве решения можно выбрать значение между этими границами, например среднее геометрическое, среднее арифметическое и т. п. Однако инженерные подходы могут привести к неверным решениям при широкой “вилке” эффективных значений.

Использование нейронных сетей возможно только при наличии большого количества экспериментальных данных. Эта группа методов имеет те же недостатки, что и эмпирические подходы.

Численное моделирование эффективных свойств горных пород на основе данных об их структуре имеет свои проблемы. До сих пор еще не было создано ни одной работающей модели, позволяющей моделировать как упругие, так и транспортные свойства горных пород при насыщении их различными флюидами. Трудность состоит в установлении реальной структуры породы, в определении свойств между контактами зерно-зерно и зерно-флюид и др. На сегодняшний день томография образцов с разрешением 1 мкм возможна только для образцов размером не более 10 мм, тогда как представительный размер образца может быть больше 10 мм.

Методы теории эффективных сред позволяют учесть особенности структуры породы при расчете ее эффективных свойств. Неоднородная среда заменяется однородной средой с эффективными свойствами путем упрощения учета взаимодействия полей напряжения и деформации между неоднородностями среды. В данной работе использовался наиболее универсальный из методов теории эффективных сред – метод обобщенного сингулярного приближения.

#### ОБОБЩЕННОЕ СИНГУЛЯРНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД

Обобщенное сингулярное приближение используется для решения задачи учета многочастичного взаимодействия при записи уравнения, эквивалентного уравнению Дайсона в квантовой электродинамике. В обобщенном сингулярном приближении теории случайных функций осуществляется учет всех типов взаимодействия в предположении нулевой дисперсии полей деформации и напряжения в отдельных неоднородностях.

Формула для расчета эффективных физических свойств композитных сред дается в следующем виде [Шермергор, 1977]:

$$\mathbf{X}^* = \left\langle \mathbf{X}(\mathbf{r}) \left( \mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{X}(\mathbf{r}) - \mathbf{X}^c) \right)^{-1} \right\rangle \left\langle \left( \mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{X}(\mathbf{r}) - \mathbf{X}^c) \right)^{-1} \right\rangle^{-1}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{X}^*$ ,  $\mathbf{X}(\mathbf{r})$  – это эффективный и локальный тензоры теплопроводности или упругости для тепловой или упругой модели породы;  $\mathbf{g}$  – вторая производная тензорной функции Грина уравнения равновесия, зависящая от формы неоднородностей и свойств тела сравнения;  $\mathbf{X}^c$  – соответствующий тензор тела сравнения, свойства которого зависят от структуры среды,  $\mathbf{I}$  – единичный тензор. Треугольные скобки обозначают усреднение по репрезентативному объему образца.

Для упрощения расчетов математическая модель среды представлена в виде множества минеральных зерен, неоднородностей, органических включений, элементов пустотного пространства, имеющих форму эллипсоидов вращения. Для изотропной среды тензор теплопроводности имеет нулевой ранг, а тензор упругости взаимно-однозначно определяется по продольной и поперечной скоростям прохождения упругих волн.

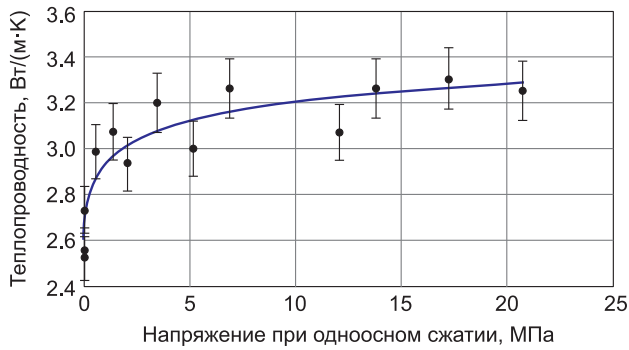
#### ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНИКА БЕНТХАЙМЕР

В настоящей работе в качестве объекта изучения был выбран верхнемеловой ( $K_2$ ) песчаник Бентхаймер, отложения которого встречаются на северо-востоке Нидерландов (месторождение Шенебек) и в графстве Бад-Бентхайм (Германия, Нижняя Саксония). Этот песчаник часто используется в лабораториях для тестирования оборудования в силу его однородности как по минеральному составу, так и по физическим свойствам. Были проведены измерения эффективных физических свойств на 20 стандартных образцах с размерами  $30 \times 50$  мм при комнатной температуре и атмосферном давлении и на двух цилиндрических образцах с размерами  $50 \times 30$  мм в условиях приложенной осевой нагрузки до 20 МПа.

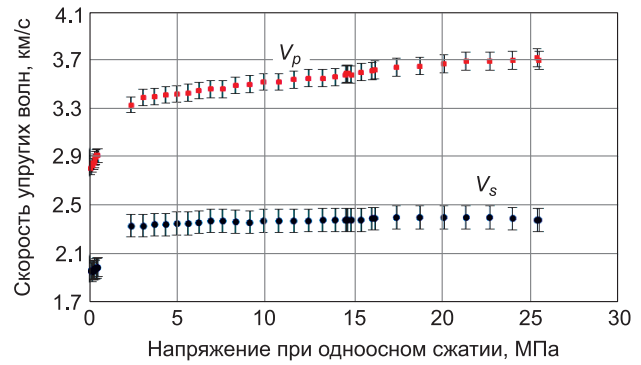
Для измерения фильтрационно-емкостных характеристик был использован стандартный автоматизированный прибор AP-608, произведенный компанией Coretest systems. Измерения были произведены под давлением 3.5 МПа, насыщающий флюид – гелий. Диапазоны изменения пористости, проницаемости и плотности образцов составили 22.7–23.4 %, 3.25–3.57 Д и 1.99–2.03 г/см<sup>3</sup> соответственно.

Для измерения теплопроводности (ТС) в лабораторных условиях был использован метод оптического сканирования – прецизионный неразрушающий бесконтактный способ измерения тепловых свойств образца. Для измерения продольной и поперечной акустических скоростей ( $V_p$  и  $V_s$ ) при комнатной температуре и атмосферном давлении использовали стандартный метод сквозного ультразвукового просвечивания с помощью точечных пьезоэлектрических датчиков с частотой 1 МГц с приложенным давлением 0.12 МПа. Измерения проводили как на сухих, так и на флюидонасыщенных образцах. В качестве насыщающего флюида была использована модель пластовой воды (раствор NaCl плотностью 15 г/л). Модель пластовой воды обладает контрастными свойствами по отношению к воздуху как по тепловым свойствам ( $TC_{м.пл. воды} = 0.6$  Вт/(м·К),  $TC_{возд} = 0.024$  Вт/(м·К)), так и по упругим свойствам –  $V_{p-м. пл. воды} = 1.48$  км/с,  $V_{p-возд} = 0.33$  км/с [Bark, 1964]. Результаты измерений приведены в работе [Ялаев и др., 2015]. Диапазоны изменения  $TC$ ,  $V_p$  и  $V_s$  для сухих образцов (здесь и далее с нижним индексом “d”) следующие:  $TC_d = 2.72$ – $3.06$  Вт/(м·К),  $V_{pd} = 2.47$ – $2.89$  км/с,  $V_{sd} = 1.61$ – $1.84$  км/с. Диапазоны изменения этих величин для образцов, насыщенных флюидом, составляют (здесь и далее с нижним индексом “w”):  $TC_w = 4.52$ – $4.71$  Вт/(м·К),  $V_{pw} = 3.20$ – $3.39$  км/с,  $V_{sw} = 1.55$ – $1.68$  км/с. Физические свойства образцов Бентхаймер не зависят от направления (изотропны).

Для измерения механических и тепловых свойств исследуемой породы под осевой нагрузкой были использованы две специальные ячейки (ячейки-керна-



**Рис. 1.** Изменение теплопроводности песчаника Бентхаймер при осевом сжатии до 21 МПа.



**Рис. 2.** Изменение скоростей упругих волн песчаника Бентхаймер при осевом сжатии до 26 МПа.

держатели). Одна из ячеек, разработанная для проведения измерений на цилиндрических образцах диаметром 50 мм, была дополнена линейным источником постоянного тепла с постоянной мощностью. Данная ячейка позволяет проводить измерения теплопроводности в зависимости от различной создаваемой нагрузки. Описание подобной схемы можно найти в работе [Миклашевский и др., 2006]. Другая ячейка представляла собой стандартную ячейку кернодержателя, которая используется для измерений механических свойств цилиндрических образцов с размерами  $30 \times 50$  мм. Измерения статического и динамического модуля упругости проводили в условиях контроля приложенной осевой нагрузки по стандартам [ГОСТ 21153.8-88, 28985-91; ASTM, 1983, 2010].

Мы провели измерения теплопроводности на двух цилиндрических образцах размером  $50 \times 30$  мм под контролем осевой нагрузки на торцевые поверхности цилиндров, установив линейный источник между этими двумя образцами. Постоянный ток мощностью 0.2 Вт подавался через сенсор, изготовленный из платиновой проволоки диаметром 0.1 мм. Падение напряжения измеряли вдоль 20-мм секции сенсора в течении 180 с, используя четырехпроводную мостовую схему. Повышение температуры линейного источника определяли из изменения сопротивления сенсора, используя температурную зависимость удельного сопротивления платины. Во всех измерениях повышение температуры не превышало  $3^\circ\text{C}$ .

На рисунке ниже представлена зависимость теплопроводности образцов песчаника Бентхаймер от осевой нагрузки (рис. 1). Каждая точка представляет собой усреднение по серии измерений. Для усреднения использовалось не менее пяти значений теплопроводности для фиксированной осевой нагрузки. Между измерениями проходил 1 час для того, чтобы тепло, выделенное источником, успевало рассеяться и условия проведения измерений оставались постоянными. После каждой серии измерений образец разгружали перед проведением следующей серии измерений.

Ошибка измерений составила  $\pm 4\%$  при доверительной вероятности  $2\sigma$ . Тестирование методики проводилось на эталонных образцах из керамики Rucosgam ( $TC = 4.06 (\pm 0.24)$  Вт/(м·К)) и кварцевого стекла ( $TC = 1.35 (\pm 0.02)$  Вт/(м·К)), сертифицированных производителями.

Измерения скоростей упругих волн образцов песчаника Бентхаймер при осевой нагрузке проводились

последовательно двумя способами в разных диапазонах осевой нагрузки: 0.1–0.5 МПа и 2.3–26.0 МПа. Измерения скоростей упругих волн при низких значениях осевой нагрузки были проведены с помощью пьезоэлектрических датчиков с частотой 1 МГц с использованием чувствительного датчика силы, позволяющего нагружать образец с небольшим шагом 0.05 МПа. Измерения скоростей при высоких значениях нагрузки проводились в специальной ячейке с пьезоэлектрическими датчиками с частотой 1 МГц, защищенными титановыми корпусами, в процессе проведения теста на неограниченное одноосное сжатие [ГОСТ 21153.7-75]. Скорость осевой деформации при проведении измерений составляла  $6 \cdot 10^{-6}$  с $^{-1}$ . Волновые формы записывались каждые 30 с при помощи электронного осциллографа.

Калибровка измерительных приборов для измерения скоростей упругих волн была проведена на эталонном алюминиевом сплаве Д-16 ( $V_p = 6.38$  км/с и  $V_s = 3.22$  км/с, согласно данным производителя). Случайная ошибка измерений скоростей продольных и поперечных упругих волн составила менее 2 и 4 % соответственно.

На рисунке ниже представлены результаты измерений скоростей упругих волн образцов песчаника Бентхаймер в зависимости от приложенной осевой нагрузки (рис. 2).

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНИКА БЕНТХАЙМЕР

Для описания структуры песчаника Бентхаймер был проведен визуальный анализ стандартного керна, подготовлены и изучены шлифы (рис. 3). Литолого-петрографический анализ песчаника Бентхаймер проведен по двум прозрачным шлифам. Макроскопически песчаник Бентхаймер имеет массивную структуру, т. е. определение направления напластования в образце не представлялось возможным, поэтому из образца песчаника для изготовления шлифов были выпилены две пластины, перпендикулярные друг другу. Условно одно направление мы назвали параллельным, второе перпендикулярным. Песчаник Бентхаймер не обладает выраженными особенностями строения в каком-либо из выбранных направлений, поэтому в данной работе описаны результаты, полученные только в условно параллельном направлении.

Литолого-петрографический анализ прокрашенных прозрачных шлифов песчаника Бентхаймер проведен с помощью микроскопа Imager M1m и про-

граммного обеспечения AxioVision 4.8.1. Структура песчаника однородная, преобладает мелкозернистая фракция (61 %) с небольшим содержанием крупнозернистой фракции – 1 %, содержание среднезернистого материала составляет 22 %, алевритового – 15 %.

Обломочный материал представлен кристаллокластами кварца (94 %), калиевого полевого шпата (2 %) и литокластами кварцитов и сланцев (3 %). Форма обломков удлиненная (эллипсоидная), изометричная, таблитчатая. Преобладают полуокатанные обломки.

По результатам литолого-петрографического анализа мы построили следующую математическую модель физических свойств песчаника Бентхаймер:

- обломочный материал, представленный в песчанике, имеет эллипсоидальную форму, с фиксированным аспектным отношением;
- аспектное отношение обломочного материала составляет 0.6; это значение было рассчитано с помощью программы AxioVision 4.8.1 по фотографиям шлифов;
- форма элементов порового пространства имеет унимодальное распределение, подчиняющееся бета-распределению с двумя неизвестными параметрами (рис. 4).

Для расчета эффективных свойств с помощью метода обобщенного сингулярного приближения теории эффективных сред в формуле (1) необходимо задать свойства тела сравнения. Если структура пустотного пространства содержит большое количество каналов, что соответствует описанию песчаника Бентхаймер, следует выбрать тело сравнения в виде  $X^c = f \cdot X^{mat} + (1 - f) \cdot X^{flu}$ , где  $f$  – параметр связности пустот, который меняется от 0 до 1.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПЕСЧАНИКА БЕНТХАЙМЕР

Для описания математической модели физических свойств песчаника Бентхаймер мы использовали следующие параметры: пористость, плотность, теплопроводность матрицы (обломочного материала и минералов), тензор упругости матрицы (два независимых параметра), параметры бета-распределения формы элементов пустотного пространства (два независимых параметра) и параметр связности.

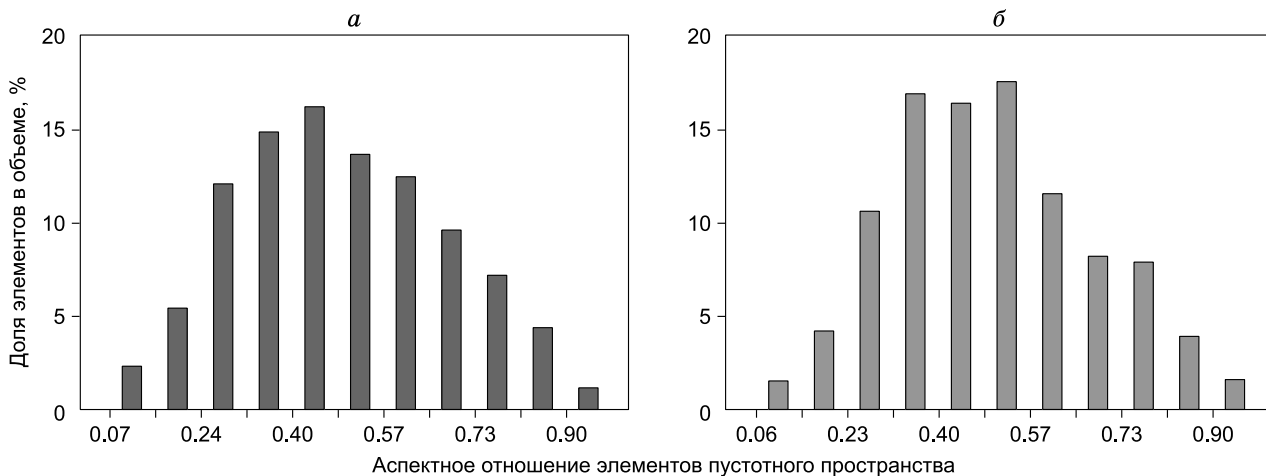


Рис. 4. Распределение аспектного отношения элементов пустотного пространства, полученное для песчаника Бентхаймер с помощью программы AxioVision 4.8.1:

$a$  – изображение для условно параллельного направления,  $b$  – изображение для условно перпендикулярного направления.

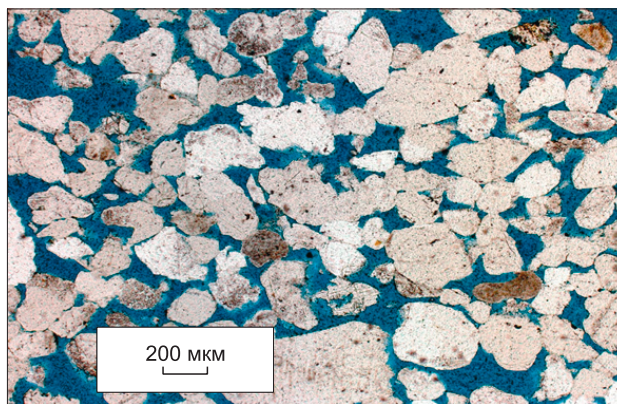


Рис. 3. Структура песчаника Бентхаймер (прокрашенный прозрачный шлиф).

Неизвестные параметры были определены в результате решения нелинейной оптимизационной задачи с ограничениями на параметры модели (обратная задача). Для этого был построен следующий функционал:

$$\Psi = \sum \left( \frac{TC_d^{расч} - TC_d^{эксн}}{TC_d^{эксн}} \right)^2 + \sum \left( \frac{TC_w^{расч} - TC_w^{эксн}}{TC_w^{эксн}} \right)^2.$$

Расчетные значения  $TC_d^{расч}$  и  $TC_w^{расч}$  были получены в результате решения уравнения (1). Суммирование проводилось по числу сухих и водонасыщенных образцов соответственно.

В качестве определяющего метода решения задачи оптимизации с простыми ограничениями был использован метод Нелдера–Мида, также известный как метод деформируемого многогранника. Ограничения на параметры модели были введены для регуляризации обратной задачи. Исходя из генезиса песчаника Бентхаймер, были введены ограничения на диапазон изменения формы элементов пустотного пространства:  $AR^{пор} = 10^{-4} - 1$ . Предполагалось, что параметр связности меняется в диапазоне от 0.4 до 1. На параметры бета-распределения ограничения не накладывались.

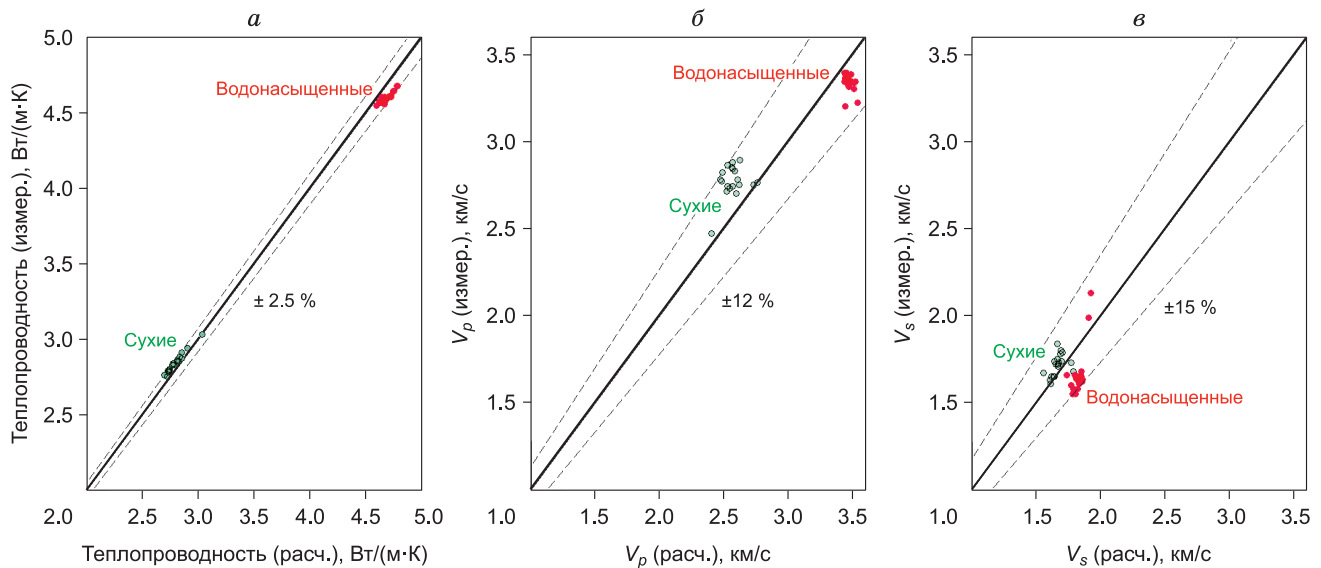
## СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

### Результаты, полученные для комнатной температуры и атмосферного давления

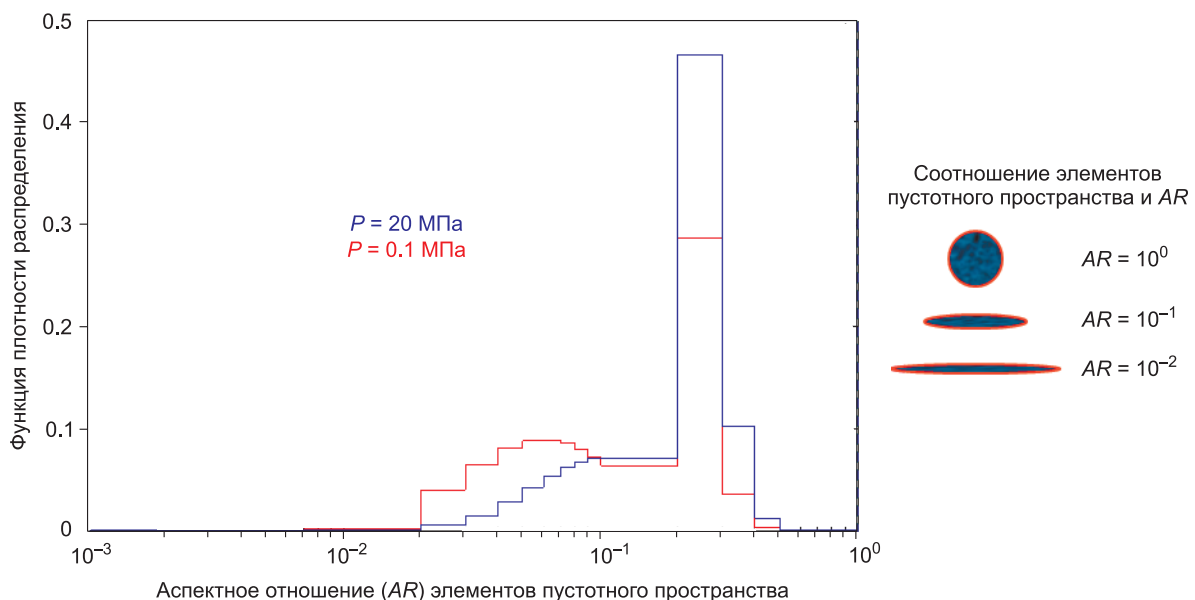
Для определения неизвестных параметров модели (решение обратной задачи) – параметров бета-распределения и параметра связности, были использованы данные о теплопроводности сухих и водонасыщенных образцов. При решении обратной задачи приемлемым расхождением между теоретической и экспериментальной теплопроводностью считалось  $\pm 2.5\%$ , что соответствует ошибке измерения теплопроводности. Затем мы использовали найденные параметры для расчета продольной и поперечной скоростей сухих и водонасыщенных образцов  $V_{pd}$ ,  $V_{pw}$ ,  $V_{sd}$  и  $V_{sw}$  (решение прямой

задачи). Для расчета прямой и обратной задач были использованы данные, найденные в открытых источниках для минерального кварца  $TC_{mat}^{quartz} = 7.6$  Вт/(м·К),  $V_{pmat}^{quartz} = 5.9$  км/с,  $V_{smat}^{quartz} = 3.94$  км/с и  $\rho_{mat}^{quartz} = 2.65$  г/см<sup>3</sup>.

Расхождение между расчетными и измеренными скоростями упругих волн для всех образцов в сухом и водонасыщенном состоянии составило не более 12 и 15 % для  $V_p$  и  $V_s$  соответственно (рис. 5). Интересно отметить, что для сухих образцов расчетные значения транспортных свойств, как правило, занижены, а для водонасыщенных – завышены. Указанный разброс учитывает ошибку, с которой были определены входные данные задачи – 2.5 % [Ялаев и др., 2015].



**Рис. 5.** Сравнение расчетных и экспериментальных данных по теплопроводности (а), скоростям продольных (б) и поперечных (в) упругих волн для сухих и водонасыщенных образцов песчаника Бентхаймер при комнатной температуре и атмосферном давлении.



**Рис. 6.** Сравнение структуры порового пространства (распределения аспектного отношения элементов порового пространства) при различных осевых нагрузках 0.1 и 20 МПа.

## Результаты, полученные в условиях приложенной осевой нагрузки образцов

Для прогноза зависимости скоростей распространения продольных и поперечных волн от осевого напряжения мы использовали результаты измерения теплопроводности в различных напряженных состояниях. Для этого мы оценили степень изменения структуры пустотного пространства: закрытие части трещин, изменение формы отдельных пор и трещин и т. д. В результате были рассчитаны параметры бета-распределения  $\alpha$ ,  $\beta$  формы элементов порового пространства для нескольких значений осевого напряжения. Отметим, что пористость образца в процессе нагрузки изменилась незначительно (менее 0.01 %). Эта оценка была проведена на основании изменения объема образца при его нагружении. Следовательно, изменение свойств образца определяется именно изменением параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ . На рисунке ниже приведены гистограммы распределения аспектного отношения элементов пустотного пространства для давлений 0.1 и 20 МПа (рис. 6). Трещинная часть соответствует аспектному отношению с меньшим значением, а поры сферической формы имеют аспектное отношение, равное единице. Как видно из рисунка, часть трещин закрылась или приобрела более сферическую форму.

Для всего диапазона нагрузки 0.1–20 МПа были рассчитаны параметры пустотного пространства  $\alpha$ ,  $\beta$ . Затем эти параметры были использованы для расчета зависимости скорости распространения продольных и поперечных волн от осевого напряжения (рис. 7).

### ВЫВОДЫ

Проведено комплексное исследование физических свойств песчаника Бентхаймер: определены теплопроводность, скорости продольных и поперечных волн для сухих и водонасыщенных образцов как при комнатной температуре и атмосферном давлении, так и в зависимости от приложенной осевой нагрузки. Полученные экспериментальные данные о физических свойствах песчаника Бентхаймер и его структуре дали возможность построить параметрическую математическую модель его физических свойств с использованием теории эффективных сред. На основании построенной модели установлена связь между теплопроводностью породы и скоростями продольных и поперечных волн.

При комнатной температуре и атмосферном давлении для разброса в значениях расчетной и экспериментальной теплопроводности 2.5 % соответствующий разброс для скоростей продольной и поперечных волн составил соответственно не более 12 и 15 %. Расхождение прогнозных значений скоростей продольных и поперечных волн в условиях приложения одноосной нагрузки с экспериментальными данными составляет 2 и 4 % соответственно.

Построенная математическая модель использована для количественной оценки изменения внутренней структуры исследуемого песчаника в зависимости от приложенной осевой нагрузки.

В данной работе модель физических свойств песчаника строилась на основании экспериментальных данных о теплопроводности образцов. Затем проводился прогноз упругих свойств. В такой постановке задача решалась чисто из методических соображений. Большую роль при этом сыграл богатый опыт Московского научного центра Шлюмберже в измерениях теп-

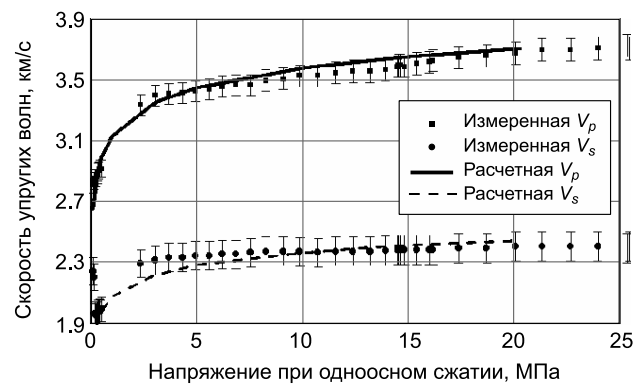


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по скоростям продольных и поперечных упругих волн для сухих образцов песчаника Бентхаймер в зависимости от приложенной осевой нагрузки.

лопроводности. Однако успешный прогноз упругих свойств на основании построенной модели позволяет сделать вывод о том, что построена унифицированная модель этих физических свойств породы, что позволит решать и задачи разведочной геофизики, востребованные на практике, — определять теплопроводность породы по данным о скоростях упругих волн.

### Литература

- Баюк И.О. Основные принципы математического моделирования макроскопических физических свойств коллекторов углеводородов // Технологии сейсморазведки. 2013. № 4. С. 5–18.
- ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.
- ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии.
- ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.
- Миклашевский Д.Е., Попов Ю.А., Вертоградский В.А., Баюк И.О. Измерения компонент тензоров теплопроводности и температуропроводности горных пород при пластовых термобарических условиях // Известия вузов. Геология и разведка. 2006. № 6. С. 38–42.
- Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородной среды. М.: Наука, 1977. 400 с.
- Ялаев Т.Р., Чехонин Е.М., Абашкин В.В., Попов Е.Ю., Ромушкевич Р.А. Применение теории эффективных сред для реконструкции тензора упругости // 17-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа EAGE “Геомодель 2015” (7–10 сентября 2015 г.). Геленджик, 2015 (DOI: 10.3997/2214-4609.201413951).
- American Petroleum Institute. Recommended Practices for Core Analysis. API RP40. 1998. 236 p.
- Andrä H., Combaret N., Dvorkin J., Glatt E., Han J., Kabel M., Keehm Y., Krzikalla F., Lee M., Madonna C., Marsh M. Digital rock physics benchmarks — Part II: Computing effective properties // Comp. Geosci. 2013. N 50. P. 33–43.
- ASTM D7012-10. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures // Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, 2010. P. 495–498.

ASTM D2845-08. Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock // American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, 1983. 7 p.

**Bark L.S.** Tables of the velocity of sound in sea water. New York: Macmillan, 1964. 218 p.

**Chekhnin E., Parshin A., Pissarenko D., Popov Y., Romushkevich R., Safonov S., Spasennykh M., Chertenkov M.V., Stenin V.P.** When rocks get hot: thermal properties of reservoir rocks // Oilfield Review. 2012. N 24 (3). P. 20–37.

**Choy T.C.** Effective medium theory: principles and applications. Oxford University Press, 2015. 182 p.

**Gueguen Y., Dienes J.** Transport properties of rocks from statistics and percolation // Mathematical geology. 1989. N 21 (1). P. 1–13.

**Hartmann A., Rath V., Clauser C.** Thermal conductivity from core and well log data // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2005. N 42 (7). P. 1042–1055.

**Jacobsen K.W., Norskov J.K., Puska M.J.** Interatomic interactions in the effective-medium theory // Physical Review B. 1987. N 35 (14). P. 7423.

**Lichtenecker K., Rother K.** Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetzes aus allgemeinen Prinzipien der stationären Strömung // Physicalische Zeitschrift. 1931. N 32. P. 255–260.

**Sugawara A., Yoshizawa Y.** An experimental investigation on the thermal conductivity of consolidated porous materials // J. Appl. Physics. 1962. N 33 (10). P. 3135–3138.

**Sugawara A., Yoshizawa Y.** An investigation on the thermal conductivity of porous materials and its application to porous rock // Australian J. Physics. 1961. N 14 (4). P. 468–480.

**Walls J.D., Sinclair S.W.** Eagle Ford shale reservoir properties from digital rock physics // First Break. 2011. 29 (6). P. 97–101.

**Zhang Z., Friedrich K.** Artificial neural networks applied to polymer composites: a review // Compos. Sci. Tech. 2003. N 63 (14). P. 2029–2044.

*Поступила в редакцию 29 апреля 2016 г.,  
в окончательном варианте – 12 мая 2016 г.*

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

**ЯЛАЕВ Тагир Рустамович** – аспирант Московского физико-технического института (государственного университета).

E-mail: tagirjala@mail.ru

**БАЮК Ирина Олеговна** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

E-mail: ibayuk@yandex.ru

**ТАРЕЛКО Николай Федорович** – кандидат технических наук, научный сотрудник Московского научного центра Шлюмберже.

E-mail: ntarelko@slb.com

**АБАШКИН Владимир Викторович** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Московского научного центра Шлюмберже.

E-mail: vabashkin@slb.com