

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 553.982.2

ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПОРОД НА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦАХ
КАК НЕОБХОДИМЫЙ ЭТАП ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Е.Ю. ПОПОВ, Р.А. РОМУШКЕВИЧ, Ю.А. ПОПОВ

*Сколковский институт науки и технологий
143026, Россия, г. Москва, ул. Нобеля, д. 3; e-mail: e.popov@skoltech.ru*

Описана методика теплофизических исследований, которая обеспечивает измерения комплекса тепловых свойств — теплопроводности, температуропроводности, объёмной теплоёмкости, коэффициента тепловой анизотропии — на стандартных образцах пород (цилиндры диаметром и высотой 30 мм), широко используемых в лабораторной нефтегазовой петрофизике. Изложены теоретические основы исследований анизотропных стандартных образцов пород при произвольной ориентации главных осей теплопроводности. Методика позволяет измерять тепловые свойства вместе с другими свойствами пород на одних и тех же образцах пород, что обеспечивает получение надежных данных о корреляционных связях тепловых свойств с другими свойствами. Важным достоинством методики исследований является возможность получения экспериментальных данных о тепловых свойствах образцов пород, последовательно насыщаемых различными поровыми флюидами. Исследования на коллекциях стандартных образцов пород с широким диапазоном пористости позволяют определять тепловые свойства минеральной матрицы пород, что необходимо при бассейновом и гидродинамическом моделировании при помощи современных симуляторов. Результаты теплофизических исследований образцов стандартного ядра дают возможность оценивать адекватность теоретических моделей теплопроводности реальным свойствам пород, определять необходимые корректирующие поправки и вносить их в современные теоретические модели теплопроводности. Показано, что применение теоретической модели среднего геометрического для оценки теплопроводности пород требует использования в ней корректирующего фактора, который может быть определен путем измерений на стандартных образцах. Приводятся полученные оценки корректирующего фактора для карбонатных пород. Результаты исследований коллекции образцов пород баженовской свиты позволили установить уравнение регрессии, характеризующее связь между теплопроводностью и общим содержанием органического вещества для коллекции образцов низкопроницаемых пород-коллекторов, дали возможность определить теплопроводность минеральной матрицы пород. Установлены существенные особенности данных характеристик для радиоларитов. Приведены данные о корреляционной связи теплопроводности и скоростью продольной упругой волны, полученные при исследованиях стандартных образцов коллекции доломитов.

Ключевые слова: стандартные образцы, тепловые свойства пород, измерения, анизотропия, неоднородность, корреляционные связи, оптическое сканирование.

MEASUREMENTS OF THE ROCK THERMAL PROPERTIES ON THE STANDARD
CORE PLUGS AS A NECESSARY STAGE OF THE THERMALPHYSIC
INVESTIGATIONS OF THE HYDROCARBON FIELDS

E.YU. POPOV, R.A. ROMUSHKEVICH, YU.A. POPOV

*Skolkovo Institute of Science and Technology
143026, Russia, Moscow, Nobelya street, building 3; e mail: e.popov@skoltech.ru*

A technique of the thermal investigations of rock samples is described that provides measurements of the rock thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric heat capacity, and thermal anisotropy coefficient on standard core plugs (cylinders with a diameter and height of 30×30 mm) that are being used widely in laboratory oil&gas petrophysics. A theoretical basis of the anisotropic core plugs investigations is given when the principal axes of the

thermal conductivity are oriented arbitrarily. The technique allows to measure the rock thermal properties and other rock properties just on the same rock samples that provides reliable data on correlations between the thermal properties and other properties. A technique important peculiarity is that the thermal property measurements on the core plugs successively saturated with the different fluids are possible. Determination of the thermal properties of the rock mineral matrix, that are necessary for the basin and hydrodynamic modeling with the modern simulators, became possible due to the technique application. The results of the thermal core plugs investigations can be used for testing of correspondence of the theoretical models of the thermal conductivity to real rock properties and for necessary theoretical model corrections estimations and their implementation in the theoretical models. It is demonstrated that application of the geometrical mean mixing law for the rock thermal conductivity prediction requires introduction of a correction factor that can be determined from the thermal measurements on the standard core plugs. Experimental estimations of the correction factors for carbonates are given. The thermal investigations of Bazhen formation rocks provided the data on the regression equations for correlations between the thermal conductivity and total organic carbon and on rock matrix thermal conductivity. Essential peculiarities of these characteristics were established for radiolarites. The data on correlations between the thermal conductivity and compressive sonic wave velocity for dolomites are given that were obtained from the core plug collection investigations.

Keywords: standard core plugs; rock thermal properties; measurements; anisotropy; inhomogeneity; correlations; optical scanning.

Современные базы данных, материалы публикаций и теоретическое моделирование тепловых свойств не могут обеспечить достаточно надёжную информацию о теплопроводности, объёмной теплоёмкости, степени тепловой анизотропии пород, необходимую для таких задач, как моделирование осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем, гидродинамическое моделирование резервуаров тяжёлой нефти при добыче с тепловым воздействием на продуктивный пласт, интерпретация результатов термометрии в скважинах, определения плотности теплового потока и других задачах поиска, разведки и разработки месторождений углеводородов. Задача осложняется тем, что представительные экспериментальные данные о тепловых свойствах резервуаров углеводородов необходимы для случаев насыщения пород разными поровыми флюидами (пластовая вода, газ, нефть, их различные комбинации). На начальной стадии образцы пород должны исследоваться в состоянии, близком к природному насыщению. После этого образцы должны экстрагироваться, исследоваться в высушенном состоянии и после этого насыщаться нефтью (или моделью нефти) и моделью пластовой воды. Для всех этих состояний измерения тепловых свойств должны выполняться на одних и тех же образцах пород, чтобы исключить существенное влияние неоднородности пород. Такой цикл работ тяжело осуществить на образцах полноразмерного керна из-за их значительных размеров, поэтому наиболее целесообразно проводить его на образцах малых размеров. Кроме того, при упоминаемых выше бассейновом и гидродинамическом моделировании в случаях применения современных симуляторов требуются данные о тепловых свойствах минеральной матрицы, позволяющие оценивать тепловые свойства пород с различным насыщением при помощи теоретических моделей тепловых свойств [2, 18]. Важной задачей петрофизических исследований является установление корреляционных связей тепловых свойств с другими физическими свойствами пород, что требует измерений всего комплекса интересующих свойств на одних и

тех же образцах пород для исключения искажающего влияния неоднородности образцов пород на результаты работ.

В практике современной нефтегазовой петрофизики необходимым этапом петрофизических работ являются комплексные лабораторные исследования пород с измерениями физических свойств на так называемых стандартных образцах керна [4]. Эти образцы представляют собой цилиндры диаметром 30 мм и высотой 30 мм, которые высверливаются в петрофизических лабораториях из образцов полноразмерного керна. Небольшие размеры образцов облегчают их полноценное экстрагирование, высушивание и насыщение пластовой водой, нефтью или её моделью — керосином. Образцы стандартного керна предназначены в нефтегазовой петрофизике для измерений широкого круга физических свойств пород (пористость, проницаемость, плотность, скорости упругих волн, электрическая проводимость и др.) при разных состояниях одних и тех же образцов стандартного керна (до экстрагирования, после экстрагирования и высушивания, после насыщения водой, а также нефтью или керосином, который является моделью нефти по ряду физических свойств), поэтому изменения формы или размеров образцов для адаптации их для каких-либо исследований не допускаются. Для более обоснованного отбора образцов полноразмерного керна и их участков, на которых высверливают образцы стандартного керна, могут быть использованы результаты предварительного непрерывного бесконтактного высокоразрешающего профилирования всех образцов полноразмерного керна вдоль скважины [9, 10].

Долгое время отсутствовали методы и средства теплофизических измерений, которые могли обеспечить неразрушающие измерения главных значений тензора теплопроводности, коэффициента тепловой анизотропии, объёмной теплоёмкости пород на стандартных образцах. Возможность проводить такие измерения впервые появилась с разработкой технологии оптического сканирования [13, 24]. Применение технологии оптического сканирования позволило внедрить теплофизические

исследования представительных коллекций стандартного керна в комплекс петрофизических исследований месторождений углеводородов [13, 25]. Ввиду того, что подготавливаемые на практике коллекции стандартных образцов включают в себя десятки и даже сотни образцов для каждой скважины, измерения комплекса тепловых свойств на коллекциях стандартных образцов не только обеспечивают формирование представительных баз данных о тепловых свойствах пород месторождений, но и позволяют использовать получаемые детальные данные о комплексе тепловых свойств для характеристики неоднородности разрезов скважин, получать важную информацию об анизотропии пород.

Как указывалось выше, теплофизические исследования стандартных образцов позволяют решать ряд важных задач, которые не могут быть решены при исследованиях тепловых свойств пород на полноразмерном крене. Это приводит к быстрому развитию измерений тепловых свойств пород на стандартных образцах и все более широкому внедрению этих работ в практику исследований месторождений углеводородов.

Только за последние годы при помощи метода и аппаратуры оптического сканирования нами изучено более 400 образцов стандартного керна для пяти скважин трёх месторождений трудноизвлекаемых и нетрадиционных запасов углеводородов. По итогам данных работ создана методика теплофизических исследований стандартных образцов при помощи технологии оптического сканирования, выявлены особенности и области применения этой методики, которые описаны в данной работе.

Аппаратурно-методическая база для измерений тепловых свойств пород на стандартных образцах

Для измерений теплопроводности, температуропроводности и объёмной теплоёмкости пород на стандартных образцах с оценкой степени тепловой анизотропии и степени неоднородности каждого образца используется лазерный вариант прибора оптического сканирования [13, 22]. В процессе таких измерений вдоль выбранных линий оптического сканирования на поверхностях стандартных образцов регистрируются непрерывные профили каждого из тепловых свойств, что позволяет учесть неоднородность образца. На рис. 1 приведены случаи оптимального сочетания линий сканирования, которое принято выбирать при теплофизических исследованиях стандартных образцов. В случаях выбора 2D модели анизотропии породы (при равенстве главных значений теплопроводности вдоль напластования ($\lambda_{\parallel}$) и их отличия от главного значения теплопроводности поперёк напластования ($\lambda_{\perp}$), что достаточно корректно в подавляющем большинстве случаев [15]) осуществляют сканирования: вдоль плоскости напластования (направления 2 и 4, на рис. 1) и перпендикулярно ей (направления 1 и 3). Результаты такого сканирования в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволяют определить главные значения тензора теплопроводности $\lambda_{\parallel}$ и $\lambda_{\perp}$ соответственно вдоль и поперёк напластования [22]. Главное значение тензора теплопроводности $\lambda_{\parallel}$ вдоль напластования определяется сразу при сканировании перпендикулярно плоскости напластования (в направлениях 1 или 3 на рис. 1, а и в направлениях 1 или 3 на рис. 1, б). Главное значение тензора теплопроводности

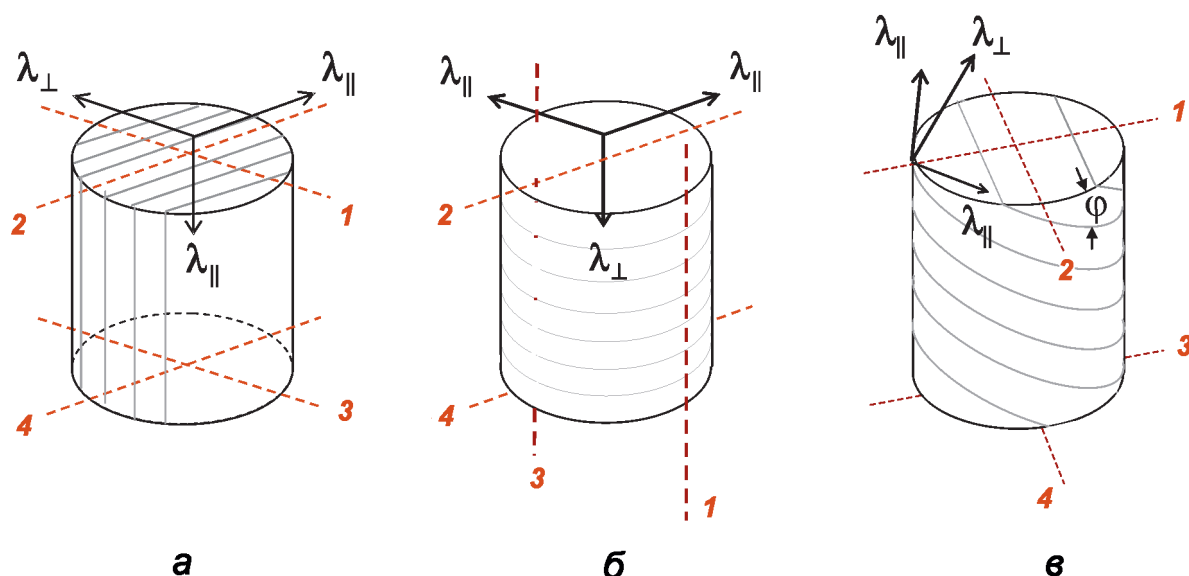


Рис. 1. К рекомендуемому выбору направлений сканирования на поверхностях образцов при теплофизических исследованиях стандартных образцов. Красные линии 1–4 – направления сканирования на поверхностях стандартного образца керна, тонкие серые линии – плоскости напластования

поперек напластования определяется расчётным путём по результатам сканирования вдоль плоскости напластования (направления 2 или 4 на рис. 1, а и направления 2 или 4 на рис. 1, б) с учётом результата определения параметра $\parallel$. Основная погрешность измерений составляет не более $\pm 2,5\%$ (при доверительной вероятности 0,95 и при равном вкладе случайной и систематической составляющих погрешности) для теплопроводности $\parallel$ вдоль напластования, не более $\pm 4\%$ для теплопроводности поперёк напластования, не более $\pm 5\%$ для объёмной теплоёмкости C , не более $\pm 5\%$ для коэффициента тепловой анизотропии K (определяемого как $K = \parallel / \perp$). Степень неоднородности каждого образца характеризуют по результатам профилирования теплопроводности, определяя коэффициент тепловой неоднородности, который рассчитывается при помощи соотношения $\text{коэф} = (\text{макс} - \text{мин}) / \text{сред}$, где мин и макс — соответственно минимальная и максимальная в пределах образца теплопроводность, сред — средняя теплопроводность образца [13]. Поскольку измерения методом оптического сканирования являются достаточно быстрыми (процесс подготовки образца занимает 1–2 мин., а процесс оптического сканирования требует 20–30 с), для дополнительного снижения случайной погрешности в необходимых случаях для каждого направления проводят не одно, а два сканирования, что позволяет снизить случайную погрешность измерений.

В наиболее распространённых случаях, когда плоскость напластования перпендикулярна плоским поверхностям образца стандартного керна, теплофизические измерения проводят, сочетая сканирование вдоль двух взаимно перпендикулярных линий 1 и 2 на плоской поверхности образца (рис. 1, а).

Для снижения влияния неоднородности образцов на результаты определения $\parallel$ и $\perp$ в случаях, приведённых на рис. 1, а, б и в, для каждого направления сканирования выбирают две параллельные линии на противоположных частях поверхности образца (например, на рис. 1, а линии 1 и 3 для одного направления сканирования и линии 2 и 4 для перпендикулярного направления сканирования). В таком случае измерениями охватывается почти весь объём образца керна, так как глубина теплофизического зондирования методом оптического сканирования в данном случае составляет 10–15 мм [22]. В таком случае главные значения тензора теплопроводности породы, согласно [22], определяют при помощи соотношений:

$$\parallel = (\text{каж1} + \text{каж3})/2, \quad (1)$$

где каж1 и каж3 — результаты измерений «кажущейся» (см. ниже) теплопроводности при сканировании вдоль линий соответственно 1 и 3,

$$\perp = [(\text{каж2} + \text{каж4})/2]^2 / [(\text{каж1} + \text{каж3})/2], \quad (2)$$

где каж2 и каж4 — результаты измерений «кажущейся» теплопроводности [20] при сканировании вдоль линий соответственно 2 и 4.

Если плоскость напластования параллельна плоским поверхностям стандартного образца, необходимым является сканирование на цилиндрической поверхности образца (рис. 1, б). В таких случаях для определения главных значений тензора теплопроводности по результатам сканирования вдоль направлений 1–4 используют соотношения (1) и (2). Вследствие неадекватности условий такого эксперимента теоретической модели метода оптического сканирования, предусматривающей сканирование на плоской поверхности образцов пород, необходима оценка систематической погрешности измерений, допускаемой при сканировании по цилиндрической поверхности. Оценку такой погрешности проводят путем сравнения результатов измерений тепловых свойств на плоской и цилиндрической поверхностях предварительно отобранного изотропного образца с близкими тепловыми свойствами (возможен выбор промышленного материала).

Известно, что в общем случае (при 3D анизотропии твёрдого тела) при произвольном направлении линии сканирования относительно главных осей теплопроводности A , B и C образца породы результат измерений теплопроводности не отражает отдельно взятые главные компоненты тензора теплопроводности A , B или C для указанных главных осей теплопроводности, а представляет собой функцию данных главных компонент теплопроводности («кажущуюся» теплопроводность), которая определяется соотношением [22]:

$$\text{каж} = \sqrt{A^2 \cos^2 \alpha + B^2 \cos^2 \beta + C^2 \cos^2 \gamma}, \quad (3)$$

где α , β и γ — углы между линией сканирования и соответственно главными осями теплопроводности A , B и C .

Из соотношений (1) и (3) следуют соотношения (4) и (5), позволяющие определять главные значения тензора теплопроводности $\parallel$ и $\perp$ для образцов с 2D анизотропией в ситуациях, когда плоскость напластования наклонена к плоской поверхности образца под углом (рис. 1, в), по результатам сканирования по направлениям 1–4:

$$\parallel = \frac{\sqrt{\frac{\text{каж1}^2 + \text{каж3}^2}{2} + \frac{\text{каж2}^2 + \text{каж4}^2}{2} \cos^2 \theta}}{\sin \theta}, \quad (4)$$

$$\perp = \frac{\sqrt{\frac{\text{каж1}^2 + \text{каж3}^2}{2} + \frac{\text{каж2}^2 + \text{каж4}^2}{2} \cos^2 \theta}}{\sqrt{\frac{\text{каж1}^2 + \text{каж3}^2}{2} + \frac{\text{каж2}^2 + \text{каж4}^2}{2} \cos^2 \theta}}. \quad (5)$$

В случаях, когда определение направления главных осей теплопроводности перед её измерениями является затруднительным, предварительно находят направление этих осей. Для этого осуществляют сканирование на плоской поверхности стандартного образца, пересекающей плоскость напластования (рис. 1, а), последовательно вдоль нескольких линий с изменением их положения, которое проводят путём их сдвига каждый раз на 15–30° относительно оси стандартного образца [23, 24].

Учёт анизотропии и измерения главных значений теплопроводности при исследованиях стандартных образцов пород являются обязательными, так как это существенно влияет на результаты петрофизических исследований как при подготовке баз исходных данных по свойствам пород, так и при анализе корреляционных связей [7, 12, 23].

Исследования корреляционных связей между теплопроводностью и другими свойствами пород

Стандартные образцы пород изготавливаются из полноразмерного керна для наиболее представительных интервалов глубин и используются в нефтегазовой петрофизике для измерений целого комплекса физических свойств пород на отдельно взятом стандартном образце. Измерения комплекса свойств на одном и том же образце осуществляется с целью резко снизить влияние неоднородности пород на надёжность результатов анализа взаимосвязей свойств.

Поскольку традиционные технологии измерений тепловых свойств не обеспечивали измерения на стандартных образцах пород, внедрение технологии оптического сканирования в практику лабораторных петрофизических исследований впервые предоставило возможность изучения корреляционных связей между тепловыми и другими свойствами пород на максимально высоком для современных условий уровне надёжности.

Теплофизические исследования коллекций образцов, отобранных с достаточно широким диапазоном их пористости, впервые открыли возможность определений теплопроводности и объёмной теплоёмкости минеральной матрицы пород, необходимых для бассейнового и гидродинамического моделирования, поскольку практически для всех стандартных образцов выполняются высококачественные измерения пористости.

На рис. 2 приведены поля корреляции между теплопроводностью и пористостью для коллекции из 73 образцов карбонатных пород. Измерения тепловых свойств проводились нами последовательно: 1) после высушивания образцов (в специальной печи согласно рекомендациям по высушиванию образцов осадочных пород), 2) после насыщения образцов моделью пластовой воды и 3) после насыщения образцов керосином, который при таких исследованиях может рассматриваться как модель нефти в связи с близостью тепловых свойств нефти и керосина. Насыщение образцов флюидами проводилось при вакуумировании об-

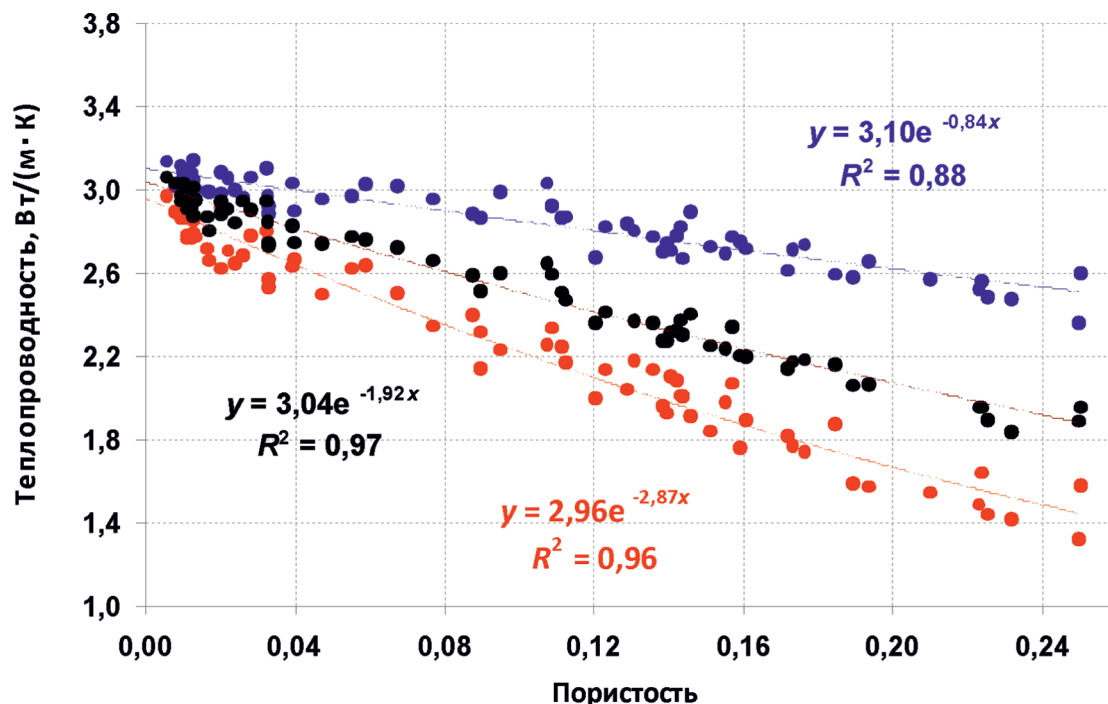


Рис. 2. Зависимости между теплопроводностью и пористостью для коллекции карбонатных пород: красный цвет — высушенные образцы, черный — насыщение моделью нефти (керосин), синий — насыщение моделью пластовой воды; в уравнениях регрессии параметр «у» соответствует теплопроводности вдоль напластования, параметр «х» — пористости пород

разцов согласно соответствующим методическим рекомендациям. Пористость каждого образца измеряли гидростатическим методом [3].

Высокие для всех состояний образцов коэффициенты детерминации (0,88–0,97, рис. 2) и достаточно широкий диапазон пористости образцов позволили с высокой степенью надёжности по уравнениям регрессии установить, что теплопроводность минеральной матрицы, соответствующая пористости равной нулю, находится в диапазоне 2,96–3,10 Вт/(м К) (рис. 2) при среднем значении 3,03 Вт/(м К).

Тесная связь теплопроводности и пористости обуславливает совпадение вертикальной зональности этих двух параметров, установленное по результатам данных измерений (рис. 3). Это обосновывает хорошие перспективы применения нового метода теплофизического каротажа на керне, заключающегося в оперативном непрерывном бесконтактном неразрушающем профилировании комплекса тепловых свойств на всем полноразмерном керне скважины с пространственной разрешающей способностью 1–2 мм [8–11]. Теплофизический каротаж на керне может существенно дополнить стандартные виды каротажа в скважинах, так как его пространственная разрешающая способность существенно выше возможностей других видов каротажа, при этом важно, что вариации ряда других физических свойств, например, скоростей упругих волн, также во многом определяются вариациями пористости пород.

Тесные корреляционные связи между объёмной теплоёмкостью и пористостью, установленные по результатам измерений на стандартных образцах этой же коллекции карбонатных пород (рис. 4), позволили из найденных уравнений регрессии (рис. 4) установить, что объёмная теплоёмкость минеральной матрицы изучавшихся пород (соответствующая пористости, равной нулю) находится в диапазоне 2,22–2,24 МДж/(м³ К) при среднем значении 2,23 МДж/(м³ К). Эти данные также необходимы для бассейнового и гидродинамического моделирования, как и теплопроводность минеральной матрицы пород [2, 18].

На рис. 5 приведено поле корреляции между теплопроводностью и скоростью продольной упругой волны V_p , построенное по результатам измерений обоих параметров на коллекции из 24 образцов доломитов (значимая тепловая анизотропия для данных образцов при измерениях не установлена). Тесная корреляция между этими двумя параметрами подтверждает указанную выше возможность использования теплофизического каротажа на керне для дополнения результатов акустического каротажа в скважинах.

В связи с разработкой и внедрением методики, обеспечивающей применение результатов теплофизического каротажа на керне для определения

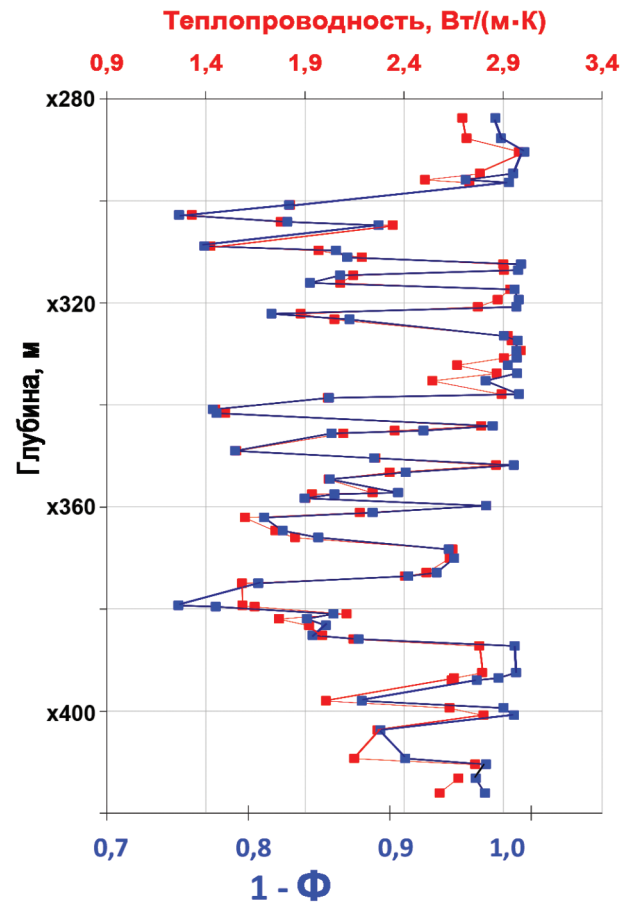


Рис. 3. Вариации теплопроводности и параметра «1 - Φ» вдоль скважины, вскрывшей карбонатные породы-коллектора резервуара углеводородов, Φ — пористость

общего содержания органического вещества в породах нетрадиционных резервуаров баженовской свиты [7, 11], важное значение имеет анализ связи теплопроводности с результатами определения общего содержания органического вещества $C_{орг}$ путём пиролиза. Такой анализ необходим для установления корреляционной связи между теплопроводностью и $C_{орг}$, а также для сравнения результатов определения $C_{орг}$ по данным о теплопроводности при помощи аналитических моделей [7]. Вместе с тем подобный анализ существенно затруднён, поскольку результаты теплофизического каротажа на керне характеризуют значительно больший (в 50–100 раз) объём породы, чем результаты пиролиза [5, 7].

Измерения тепловых свойств, проведенные методом оптического сканирования на коллекции из 114 стандартных образцов, представляющих низкопроницаемые породы-коллектора из отложений баженовской свиты, обеспечили возможность для надёжного установления взаимосвязи теплопроводности и $C_{орг}$, так как определения $C_{орг}$ проводились методом пиролиза на фрагментах полноразмерного керна, отбиравшихся в областях керна, непосредственно прилегающих к плоским поверхностям цилиндрических стандартных образцов.

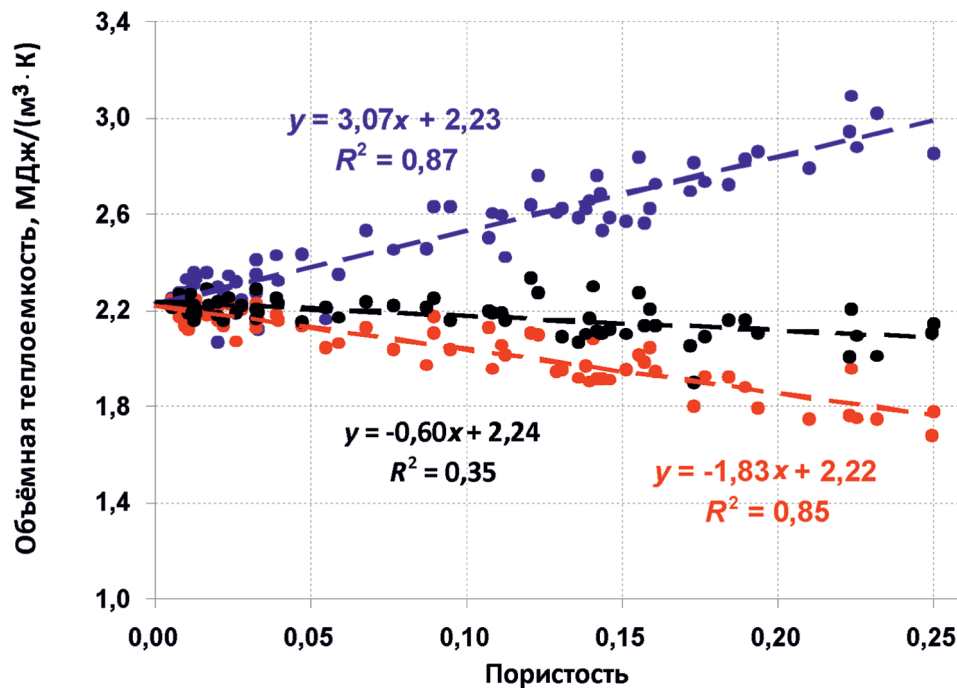


Рис. 4. Зависимости между объёмной теплоёмкостью и пористостью для коллекции карбонатных пород: красный цвет — высушенные образцы, чёрный — насыщение моделью нефти (керосин), синий — насыщение моделью пластовой воды; в уравнениях регрессии параметр «у» соответствует объёмной теплоёмкости, параметр «х» — пористости пород

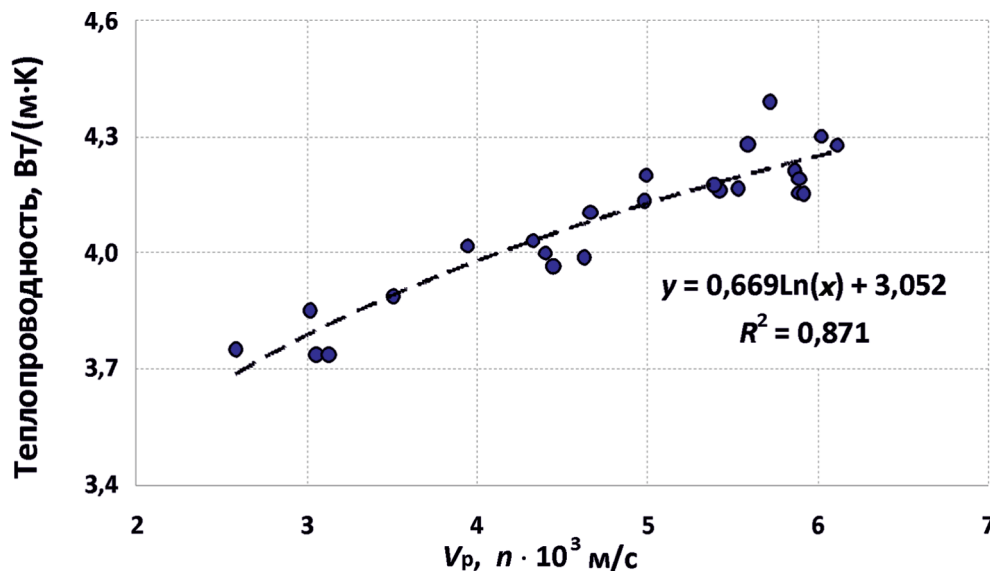


Рис. 5. Поле корреляции и уравнение регрессии между теплопроводностью и скоростью V_p продольной упругой волны для коллекции образцов доломитов; в уравнениях регрессии параметр «у» соответствует теплопроводности вдоль напластования, параметр «х» — скорости продольной упругой волны V_p пород

Поскольку для всех образцов изучавшейся коллекции пород была установлена существенная тепловая анизотропия (при коэффициенте анизотропии до 2,05 при среднем значении 1,21), для анализа взаимосвязи теплопроводности и $C_{орг}$ использовали значения компоненты теплопроводности $\parallel$, которая, как показали данные исследования, значительно более тесно связано с $C_{орг}$, чем значение

теплопроводности $\perp$. Поле корреляции между теплопроводностью $\parallel$ и $C_{орг}$ представлено на рис. 6. На представленных на рис. 6 данных из общей анализировавшейся коллекции достаточно четко выделяются 13 образцов, принадлежащих одному интервалу глубин залегания и представляющих группу радиоляритов [1]. Анализ корреляционных связей теплопроводности и $C_{орг}$ для обеих групп пород

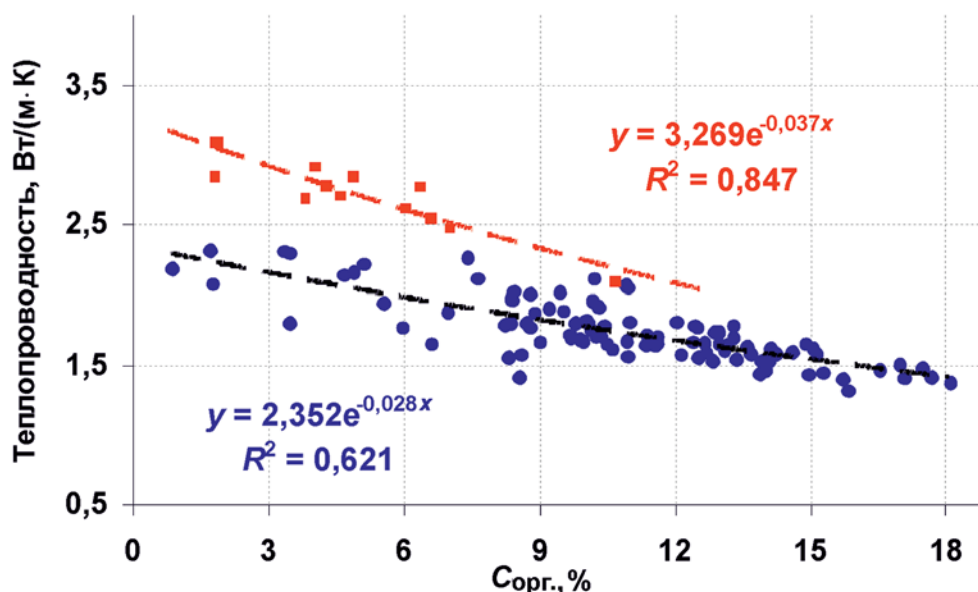


Рис. 6. Поля корреляции и уравнения регрессии, характеризующие связь между компонентой теплопроводности $\lambda_{||}$, параллельной напластованию, и общим содержанием органического вещества $C_{орг}$ для основной группы низкопроницаемых пород-коллекторов (тёмно-синий цвет) и радиоларитов (красный цвет); в уравнениях регрессии параметр «у» соответствует теплопроводности, параметр «х» — общему содержанию органического вещества $C_{орг}$ пород

позволяет сделать следующие важные выводы: 1) теплопроводность матрицы, в которую не входит органическое вещество и которая необходима для определения $C_{орг}$ по результатам теплофизического каротажа на керне с использованием аналитической модели связи теплопроводности и для бассейнового и гидродинамического моделирования, для основной группы низкопроницаемых пород составляет 2,35 Вт/(м·К) (что получено при подстановке $C_{орг} = 0$ в уравнение регрессии, приведённое на рис. 6 и соответствующее основной группе низкопроницаемых пород); 2) теплопроводность матрицы для радиоларитов, которая также необходима для прогноза $C_{орг}$ по данным теплофизического каротажа на керне, составляет 3,27 Вт/(м·К) (установлено по уравнению регрессии для радиоларитов, рис. 6), что существенно выше, чем для остальных образцов пород коллекции. Уравнения регрессии, характеризующие связь теплопроводности с $C_{орг}$ и установленные при максимально возможном в настоящее время соответствии коллекций образцов, для которых проводились измерения теплопроводности и $C_{орг}$, имеют важное значение, так как они позволяют преобразовывать результаты непрерывного профилирования теплопроводности, получаемые при теплофизическом каротаже на керне, в непрерывные профили вдоль скважины параметра $C_{орг}$. Важно, что профили параметра $C_{орг}$ регистрируются в результате с таким же высоким пространственным разрешением (1–2 мм), как и профили теплопроводности, получаемые при теплофизическом каротаже на керне [8, 10].

Приведённые на рис. 7 поля корреляции и уравнения регрессии, характеризующие связь между компонентой теплопроводности $\lambda_{\perp}$, перпендикулярной напластованию, и общим содержанием органического вещества $C_{орг}$ для основной группы низкопроницаемых пород-коллекторов и радиоларитов, показывают, что данная связь является существенно более слабой, чем в случае с теплопроводностью $\lambda_{||}$, параллельной напластованию (рис. 6). Это вновь подтверждает существенную роль анизотропии и обязательный её учёт при петрофизических исследованиях стандартных образцов, как это отмечалось в [25].

Исследования адекватности теоретической модели Лихтенеккера при оценке теплопроводности пород-коллекторов

Получение данных о теплопроводности и пористости для одних и тех же однородных в литологическом отношении стандартных образцов из коллекций осадочных пород представляют практически единственную возможность проверки адекватности той или иной теоретической модели теплопроводности реальным свойствам пород. Это связано с тем, что именно на стандартных образцах могут быть получены представительные данные для пористости и именно на тех же образцах могут быть выполнены высокоточные измерения теплопроводности с использованием приборов оптического сканирования, что минимизирует влияние тепловой неоднородности на результаты измере-

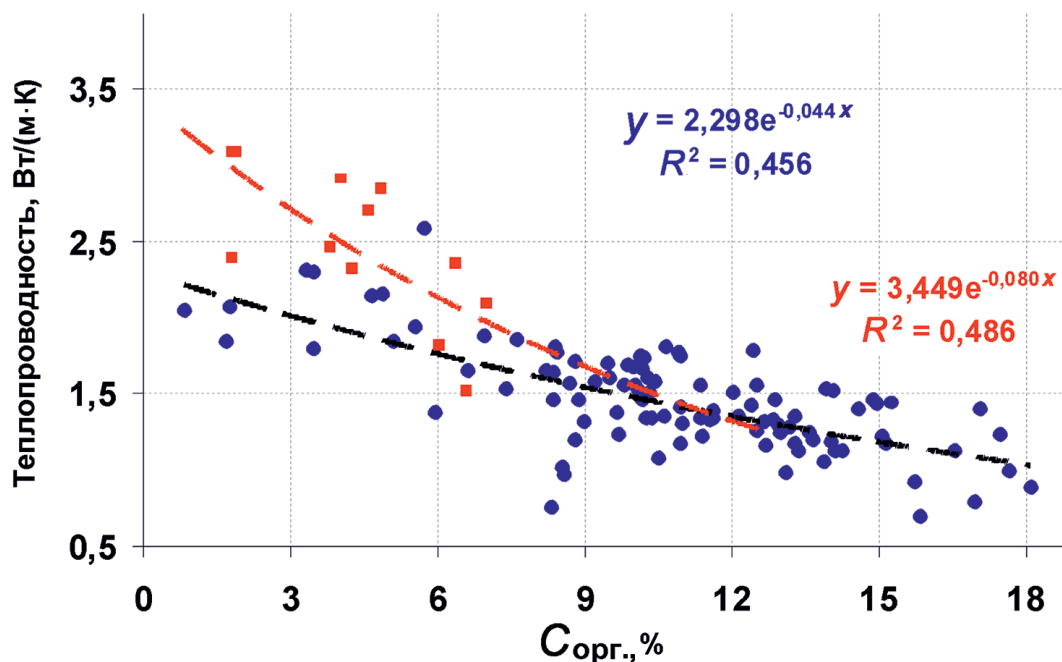


Рис. 7. Поля корреляции и уравнения регрессии, характеризующие связь между компонентой теплопроводности, перпендикулярной напластованию, и общим содержанием органического вещества $C_{орг}$ для основной группы низкопроницаемых пород-коллекторов (тёмно-синий цвет) и радиоларитов (красный цвет); в уравнениях регрессии параметр «у» соответствует теплопроводности, параметр «х» — общему содержанию органического вещества $C_{орг}$ пород

ний. Как показано в [25], при анализе связи теплопроводности и пористости необходимо использовать главное значение теплопроводности для направления вдоль плоскости напластования, что делает обязательным учёт анизотропии и измерения обеих компонент теплопроводности — $k_{\parallel}$ и $k_{\perp}$ — при петрофизических исследованиях на стандартных образцах (рис. 1).

В рамках данной работы на вышеописанной коллекции карбонатных пород были проведены исследования применимости одной из теоретических моделей теплопроводности — модели средневзвешенного геометрического среднего, называемой также моделью Лихтенеккера по имени предложившего её автора [19]:

$$k_{эфф} = \frac{f \cdot k_{флюида} + (1-f) \cdot k_{матрицы}}{f + (1-f) \cdot \phi} \quad (6)$$

где $k_{эфф}$ — эффективная теплопроводность породы, $k_{флюида}$ — теплопроводность порового флюида, $k_{матрицы}$ — теплопроводность минеральной матрицы породы, ϕ — пористость пород.

Модель Лихтенеккера наиболее часто применяется в геофизике для теоретической оценки эффективной теплопроводности пористых твёрдых тел, представляемых как двухфазная среда «однородная минеральная матрица — поровый флюид» [16—18, 20, 21]. Вместе с тем очевидно, что данная модель не может исчерпывающе корректно оценивать теплопроводность горных пород, так как теплопроводность минеральной матрицы зависит не только от её минерального состава, но и от формы минеральных зёрен, межзернового контактного

теплового сопротивления, степени тепловой анизотропии пород. Последующим развитием данной модели явилась более совершенная теоретическая модель двухфазной среды — модель Лихтенеккера-Асаада [14], в которой предложено дополнительные факторы, влияющие на теплопроводность двухфазной среды (такие как влияние формы минеральных зёрен, межзернового контактного теплового сопротивления) учитывать при помощи дополнительного корректировочного коэффициента:

$$k_{эфф} = \frac{f \cdot k_{флюида} + (1-f) \cdot k_{матрицы}}{f + (1-f) \cdot \phi} \cdot g \quad (7)$$

где g — корректировочный коэффициент, учитывающий влияние вышеуказанных факторов и позволяющий приблизить расчётное значение теплопроводности к реальной эффективной теплопроводности двухфазной среды.

Для охарактеризованной выше коллекции образцов карбонатных пород (рис. 2), изучавшейся в отношении теплопроводности и пористости, на рис. 8 приведены относительные погрешности теоретических оценок теплопроводности образцов коллекции при помощи модели Лихтенеккера (6) по отношению к экспериментальным данным. Рассмотрение проводилось для разных состояний образцов — сухих, насыщенных керосином и водой при насыщении под вакуумом. Как и в [25], результаты теоретического моделирования теплопроводности сопоставлялись с результатами измерений компоненты теплопроводности $k_{\parallel}$ вдоль напластования. Теоретические оценки при помощи соотношения (6) для разных состояний пород (су-

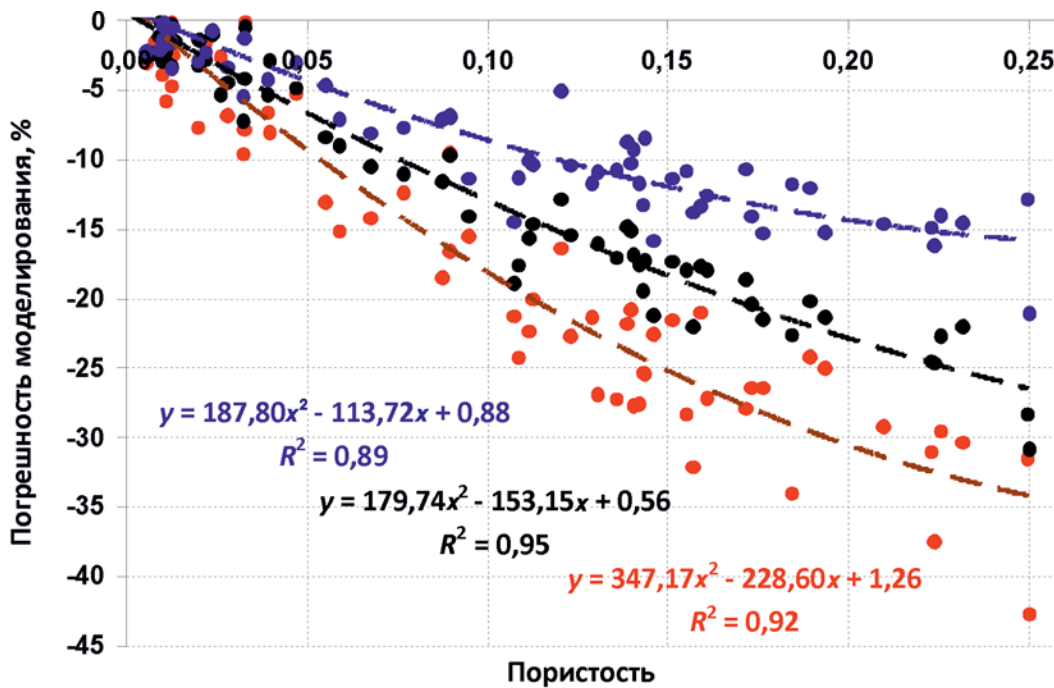


Рис. 8. Зависимость погрешности определения теплопроводности при помощи теоретической модели Лихтенеккера от пористости пород: красный цвет — сухие образцы пород, черный — насыщенные образцы моделью нефти (керосин), синий — водонасыщенные образцы; в уравнениях регрессии параметр «y» соответствует погрешности моделирования теплопроводности, параметр «x» — пористости пород

хия, нефте- и водонасыщенные) проводились с использованием оценок теплопроводности минеральной матрицы пород, сделанных при помощи уравнений регрессии, приведённых на рис. 2, для пористости $\Phi = 0$: 2,96 Вт/(м·К), 3,04 Вт/(м·К) и 3,10 Вт/(м·К) соответственно для сухих, нефте- и водонасыщенных пород. Относительные погрешности определялись по соотношению:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_{\text{модел}} - \lambda_{\text{экспер}}}{\lambda_{\text{экспер}}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $\delta\lambda$ — относительная погрешность теоретического моделирования теплопроводности при заданных пористости Φ и теплопроводности минеральной матрицы породы $\lambda_{\text{матрицы}}$, $\lambda_{\text{модел}}$ — теоретическая оценка теплопроводности при помощи модели Лихтенеккера (6) при заданных пористости Φ и теплопроводности минеральной матрицы породы $\lambda_{\text{матрицы}}$, $\lambda_{\text{экспер}}$ — результат измерений теплопроводности образца. Пористость каждого образца задавали по результатам её измерений гидростатическим методом (рис. 2).

Из рис. 8 следует, что погрешность теоретических оценок теплопроводности при помощи модели Лихтенеккера увеличивается с ростом пористости пород и закономерно уменьшается при переходе от сухих образцов к образцам, насыщенным керосином, и далее к образцам, насыщенным водой, что соответствует уменьшению контраста между теп-

лопроводностью минеральной матрицы и теплопроводностью порового флюида в ряду воздух — нефть — вода.

Применение модели Лихтенеккера—Асаада (7) с подобранными корректировочными коэффициентами: $f = 0,61$ для сухих пород, $f = 0,59$ для пород, насыщенных керосином, и $f = 0,51$ для водонасыщенных пород существенно повысило качество теоретических оценок теплопроводности. Установлено последовательное уменьшение корректировочного коэффициента f с увеличением теплопроводности флюида (в данном случае принимали 0,025 Вт/(м·К) для воздуха — 0,13 Вт/(м·К) для керосина (нефти) — 0,60 Вт/(м·К) для воды [7, 22]) и соответственно с уменьшением контраста теплопроводности минеральной матрицы пород и теплопроводности порового флюида, что согласуется с выводами [26] об увеличении погрешности применения модели Лихтенеккера с увеличением контраста в теплопроводности минеральной матрицы и порового флюида.

На рис. 9 приведены поля корреляции между теоретическими оценками теплопроводности по модели Лихтенеккера—Асаада и результатами измерений теплопроводности. Данные (рис. 9) показывают, что модель Лихтенеккера—Асаада даёт существенно более точные оценки по сравнению с моделью Лихтенеккера. Так, среднеквадратическое расхождение между теоретическими оценками по модели Лихтенеккера—Асаада и результатами измерений теплопроводности составило: $\pm 4,4\%$ для су-

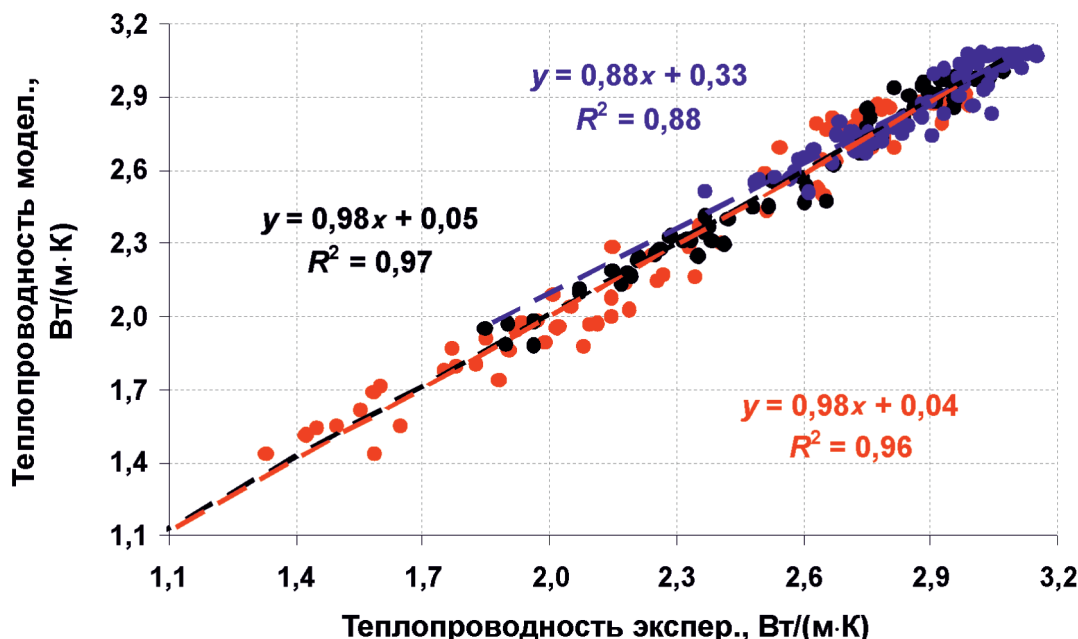


Рис 9. Поле корреляции между экспериментальными данными о теплопроводности образцов пород и результатами оценки теплопроводности при помощи теоретической модели Лихтенеккера-Асаада: красный цвет — сухие образцы пород, $f = 0,61$, чёрный — насыщение образцов моделью нефти (керосин), $f = 0,59$, синий — водонасыщенные образцы, $f = 0,51$; в уравнениях регрессии параметр « y » соответствует результатам теоретического моделирования теплопроводности, параметр « x » — результатам измерений теплопроводности

хих, $\pm 2,3\%$ для нефтенасыщенных и $\pm 2,3\%$ для водонасыщенных образцов пород изучавшейся коллекции при средних отклонениях соответственно 0,1%, 0,03% и 0,03%, что при современном уровне определения теплопроводности пород является свидетельством высокого качества модели Лихтенеккера-Асаада при любом поровом флюиде.

Полученные результаты показывают следующее:

1) применение модели Лихтенеккера для высокопористых карбонатных пород может приводить к весьма значительным погрешностям — до 13–21% для водонасыщенных, 28–31% для нефтенасыщенных и 32–43% для сухих пород;

2) при известных для выбранной разновидности пород значениях корректирующего коэффициента f модель Лихтенеккера-Асаада может обеспечивать достаточно высокое качество оценок теплопроводности, сопоставимое с лучшими современными средствами измерений теплопроводности;

3) с учётом того, что значения корректирующего коэффициента f могут находиться в широком диапазоне [6, 25] и могут быть определены только путём сопоставления результатов теоретического моделирования теплопроводности с результатами её измерений, для успешного применения теоретической модели Лихтенеккера-Асаада необходимы предварительные экспериментальные исследования теплопроводности на представительной выборке образцов изучаемого типа пород с применением прецизионного измерительного оборудования для определения корректирующего коэффи-

циента f , соответствующего данному типу пород и конкретному поровому флюиду.

Контроль за изменениями пустотного пространства и свойств минеральной матрицы пород по экспериментальным данным о тепловых свойствах

Последовательные измерения главных значений тензора теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии и исследования закономерностей их изменений при смене флюидов в пустотном пространстве используются нами в практике петрофизических исследований для оценки степени и характера микротрещиноватости пород и анализе ориентированности микротрещин [12].

Известно, что воздух, органическое вещество (нефть (керосин), кероген) и вода имеют существенно различные значения теплопроводности, которые находятся в диапазонах соответственно 0,024–0,026 Вт/(м К), 0,10–0,18 Вт/(м К), 0,58–0,60 Вт/(м К), что намного меньше теплопроводности минеральной матрицы пород (1,5–7,6 Вт/(м К) [7, 22]). В связи с этим теплопроводность пористых и трещиноватых пород должна последовательно увеличиваться при изменениях порового флюида в ряду воздух (газ) — нефть (керосин) — вода, что, в частности, наблюдалось при вышеописанных исследованиях карбонатных пород с существенной пористостью (рис. 2). Известно также, что в случаях, когда тепловая анизотропия пород обусловлена ориентированной трещиноватостью, коэффициент тепловой анизотропии при замене порового флюи-

да в той же последовательности должен уменьшаться, что наблюдается при экспериментальных исследованиях тепловых свойств трещиноватых пород [12, 25].

Вместе с тем установлено, что подобный методический подход позволяет выявлять важные особенности низкопроницаемых пород-коллекторов в цикле комплексных петрофизических лабораторных исследований, когда состояние образцов изменяют путём их экстрагирования, высушивания, насыщения нефтью (или керосином как моделью нефти) и/или моделью пластовой воды. Так, для вышеописанной коллекции образцов из отложений баженовской свиты на 109 стандартных образцах-цилиндрах из данной коллекции последовательно проводились теплофизические измерения при четырёх состояниях образцов: 1) до их экстрагирования, 2) после донасыщения керосином (имеющим тепловые свойства, близкие к свойствам нефти и другим видам углеводородов), 3) после экстрагирования с последующим высушиванием, 4) после водонасыщения под вакуумом. При каждом состоянии образцов измеряли главные значения теплопроводности $\lambda_{\parallel}$ и $\lambda_{\perp}$ соответственно вдоль и поперек напластования, объёмную теплоёмкость C , коэффициент тепло-

вой анизотропии K . Для группы из 24 образцов данной коллекции, отобранных из одного интервала глубин протяженностью 12 м, установлены изменения свойств пород, которые не могут быть объяснены замещениями флюидов в пустотном пространстве и не отвечают описанным выше закономерностям изменения тепловых свойств при изменениях состояния пород. В табл. 1 для данных образцов приведены средние результаты измерений главных значений тензора теплопроводности $\lambda_{\parallel}$ и $\lambda_{\perp}$ соответственно вдоль и поперёк напластования пород, коэффициента тепловой анизотропии K при каждом из состояний образцов и среднеквадратичные отклонения измерявшихся свойств.

Из приведённых в табл. 1 экспериментальных данных и приведённых в табл. 2 результатов оценки значимости изменений тепловых свойств образцов пород можно сделать вывод, что изучавшиеся образцы низкопроницаемых пород весьма чувствительны к разным видам воздействия на них — экстрагированию, высушиванию, водонасыщению — и претерпевают изменения тепловых свойств минеральной матрицы (очевидно, за счёт разуплотнения матрицы, изменений межзерновых контактов и свойств глинистой составляющей пород) и пус-

Таблица 1

Тепловые свойства 24 стандартных образцов пород баженовской свиты, заполняющих интервал глубин протяженностью 12 м, при изменениях их состояния по циклу «экстрагирование — керосинонасыщение — высушивание — водонасыщение» (насыщение флюидами осуществлялось при вакуумировании)

Параметры		Образцы с природным насыщением	Неэкстрагированные образцы с природным насыщением, донасыщенные керосином	Экстрагированные высушенные образцы	Водонасыщенные образцы
$\lambda_{\parallel}$	$\lambda_{\parallel}$ среднее*	1,79	1,83	1,71	1,78
	СКО ($\lambda_{\parallel}$)**	0,21	0,28	0,29	0,26
$\lambda_{\perp}$	$\lambda_{\perp}$ среднее	1,56	1,47	1,16	1,26
	СКО ($\lambda_{\perp}$)	0,28	0,36	0,40	0,35
$K = \frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}}$	K среднее	1,17	1,27	1,57	1,45
	СКО (K)	0,11	0,15	0,22	0,18

Примечание: *Среднее значение результатов измерений параметра для всей изучавшейся выборки из 24 стандартных образцов низкопроницаемых пород-коллекторов; **СКО — среднеквадратическое значение результатов измерений параметра для изучавшейся выборки из 24 стандартных образцов.

Таблица 2

Значения критерия Стьюдента для оценки значимости изменений тепловых свойств стандартных образцов пород (табл. 1) при изменении состояния образцов

Параметр	Сравнение для состояний «природное насыщение» и «природное состояние с донасыщением керосином»	Сравнение для состояний «природное состояние с донасыщением керосином» и «сухие образцы»	Сравнение для состояний «водонасыщенные образцы» и «экстрагированные высушенные образцы»	Сравнение для состояний «водонасыщенные образцы» и «природное состояние с донасыщением керосином»
$\lambda_{\parallel}$	0,57	1,49	0,90	0,65
$\lambda_{\perp}$	0,99	2,88*	0,94	2,09**
$K = \frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}}$	2,69**	5,63*	2,11*	3,84**

Примечание: *Случаи значимых изменений, объясняемых изменениями свойств флюида, заполняющего пустотное пространство; **случаи изменений свойств образцов пород, которые не могут быть объяснены изменением свойств флюида, заполняющего пустотное пространство, а обусловлены изменениями тепловых свойств минеральной матрицы, объема и формы элементов пустотного пространства.

тотного пространства. Значимость изменений тепловых свойств пород при изменениях их состояния оценивалась при помощи критерия Стьюдента (табл. 2). В случаях, когда значение критерия Стьюдента превышало 2,06, изменение свойств следует признать значимым. В табл. 2 одной и двумя звёздочками отмечены случаи, которые изменения свойств образцов пород при изменениях состава порового флюида являются статистически значимыми. Одной звёздочкой отмечены случаи, когда изменения свойств образцов объясняются изменениями теплопроводности флюида, заполняющего пустотное пространство и изменяющегося при изменении состояния образцов. Двумя звёздочками отмечены «аномальные» случаи, в которых изменения тепловых свойств пород не могут быть объяснены вариациями свойств флюидов в пустотном пространстве, а соответствуют изменениям тепловых свойств минеральной матрицы, объёма и структуры пустотного пространства.

Согласно табл. 1, 2, к «аномальным» могут быть отнесены следующие данные:

1) значимое пониженное значение компоненты $\lambda_{\perp}$ теплопроводности для водонасыщенных образцов по отношению к их естественному состоянию и состоянию после донасыщения керосином; понижение $\lambda_{\perp}$ противоречит обычно наблюдаемым ситуациям, когда заполнение ориентированных трещин более теплопроводной, чем воздух и нефть, водой приводит к повышению параметра $\lambda_{\perp}$ [12, 25];

2) значимые повышения коэффициента тепловой анизотропии при донасыщении неэкстрагированных образцов более теплопроводным, чем воздух, керосином; обычно в таких случаях наблюдается понижение коэффициента анизотропии, поскольку керосин заполняет часть пустотного пространства, освободившееся от нефти или воды и заполнившееся вместо них воздухом в процессе достаточно долгого выдерживания образцов при атмосферных условиях;

3) значимые «аномальные» повышения коэффициента тепловой анизотропии для водонасыщенных пород по сравнению с образцами с природным насыщением и по сравнению с неэкстрагированными образцами, донасыщенными керосином; замена пустотного пространства более теплопроводным флюидом (в данном случае водой) при стабильных минеральной матрице и пустотном пространстве для пород с ориентированной трещиноватостью должна приводить к снижению коэффициента анизотропии для изменения состояний образцов в последовательности «естественно-насыщенные образцы — образцы с донасыщением керосином — водонасыщенные образцы», в то время как настоящие результаты измерений имеют противоположную последовательность зна-

чений коэффициента тепловой анизотропии с его последовательным возрастанием, вместо понижения, в ряду 1,17—1,27—1,45. Объяснение такого эффекта можно связывать, помимо изменений объёма и структуры пустотного пространства, с увеличением объёмной доли ориентированных глинистых прослоек пород.

Отмеченные «аномальные» понижения компоненты теплопроводности $\lambda_{\perp}$ для водонасыщенных образцов по сравнению с естественно- и керосинонасыщенными образцами и повышение коэффициента тепловой анизотропии для водонасыщенных образцов по сравнению с естественно-насыщенными образцами и с образцами, донасыщенными керосином, однозначно свидетельствуют о значительных изменениях в минеральной матрице и пустотном пространстве, произошедших при донасыщении керосином под вакуумом, экстрагировании, высушивании и водонасыщении образцов под вакуумом.

Средняя пористость рассматриваемых 24 образцов изменялась от 0,53% на первой стадии исследований до 2,73% на завершающей стадии, что подтверждает вывод о некотором возрастании объёма порового пространства в процессе экстрагирования, высушивания и насыщения образцов керосином и водой (не часто наблюдаемом при подобных изменениях состояний пород традиционных коллекторов). Вместе с тем, существенный рост коэффициента тепловой анизотропии и значительное уменьшение теплопроводности $\lambda_{\perp}$ указывают на значительное развитие ориентированной микротрещиноватости, которая в большей степени изменяет данные тепловые свойства пород, но может не влиять существенно на пористость.

Свидетельства подобных изменений отмечены и для ряда других образцов из данной коллекции низкопроницаемых пород-коллекторов.

Более высокая чувствительность компоненты $\lambda_{\perp}$ к изменениям образцов пород по сравнению с компонентой $\lambda_{\parallel}$ показывает, что основные изменения пород при экстрагировании, высушивании и флюидонасыщении происходят в направлении, перпендикулярном плоскости напластования.

Приведённые результаты показывают, что систематический оперативный теплофизический анализ стандартных образцов в процессе стандартных петрофизических исследований помогает контролю состояния образцов в сложном петрофизическом цикле и позволяет избежать неверных результатов и выводов петрофизических измерений, так как изменения состояния образцов могут быть причиной существенных изменений других свойств образцов пород, обнаружение которых другими методами в большинстве случаев, особенно в отношении изменения анизотропии пород, весьма затруднительно.

Выводы

1. Оперативные неразрушающие измерения главных значений тензора теплопроводности, объёмной теплоемкости, коэффициента тепловой анизотропии и коэффициента тепловой неоднородности на образцах стандартного керна при различных видах поровых флюидов могут быть осуществлены путём применения лазерной версии прибора оптического сканирования.

2. Возможность измерений тепловых и других физических свойств на одних и тех же образцах пород, обеспечиваемая при комплексных измерениях на стандартном керне при его полноценном насыщении различными флюидами, обеспечивает получение надёжных данных о корреляционных связях тепловых свойств с другими свойствами пород.

3. Измерения тепловых свойств для коллекции образцов стандартного керна при насыщении их разными флюидами при диапазоне пористости образцов коллекции, обеспечивающем достаточно

надёжное установление уравнений регрессии, связывающих теплопроводность и объёмную теплоёмкость с пористостью, позволяют определять тепловые свойства минеральной матрицы пород.

4. Систематический оперативный теплофизический анализ стандартных образцов в процессе стандартных петрофизических исследований помогает обеспечивать контроль изменений свойств минеральной матрицы, пустотного пространства и анизотропии образцов пород на всех этапах петрофизического цикла, что позволяет своевременно выявлять изменения состояния образцов, которые могут приводить к неверным результатам и выводам при петрофизических исследованиях.

5. Теплофизические исследования образцов стандартного керна позволяют оценивать адекватность теоретических моделей теплопроводности реальным свойствам пород и при необходимости определять корректирующие поправки и вносить их в современные теоретические модели теплопроводности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балущкина Н.С., Калмыков Г.А., Кирюхина Т.А., Коробова Н.И., Корост Д.В., Соболева Е.В., Ступакова А.В., Фадеева Н.П., Хамидуллин Р.А., Шарданова Т.А. Закономерности строения баженовского горизонта и верхов абалакской свиты в связи с перспективами добычи нефти из них // Геология нефти и газа. 2013. № 3. С. 48–61.
2. Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. М.: Научный мир, 2007. 456 с.
3. ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. М., 1985. 35 с.
4. Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физическ. свойств нефтесодержащих пород. М.: Изд-во ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. 592 с.
5. Лопатин Н.П., Емец Т.П. Пиролиз в нефтегазовой геологии. М.: Наука, 1987. 143 с.
6. Новиков С.В. Тепловые свойства терригенных коллекторов и насыщающих флюидов. Дис. ... канд. тех. наук. М., 2009. 156 с.
7. Попов Е.Ю., Калмыков Г.А., Стенин В.П., Попов Ю.А., Спасенных М.Ю. Тепловые свойства пород баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 32–37.
8. Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Попов Ю.А., Ромушкewич Р.А., Габова А.В., Жуков В.В., Спасенных М.Ю., Богданович Н.Н., Козлова Е.В., Карпов И.А., Заграновская Д.Е., Алексеев А.Д., Беленькая И.Ю., Овчаренко Ю.В., Калмыков Г.А. Новый подход к изучению баженовской свиты на основе теплофизического профилирования керна // Недропользование XXI в. 2016. № 6. С. 52–61.
9. Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Сафонов С.С., Попов Ю.А., Ромушкewич Р.А., Герасимов И.В., Урсегов С.О., Гурбатова И.П. Результаты доизучения геологического строения пермо-карбоневой залежи Усинского месторождения путем непрерывного теплофизического профилирования керна. Geomodel 2014 — 16th EAGE science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development // База данных публикаций EAGE EarthDoc, 2017. DOI: 10.3997/2214-4609.20142229.
10. Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Сафонов С.С., Урсегов С.О., Гурбатова И.П. Теплофизическое профилирование керна при доизучении геологического строения пермо-карбоневой залежи Усинского месторождения // Известия вузов. Геология и разведка. 2016. № 6. С. 39–50.
11. Попов Ю.А., Жуков В.В., Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Ромушкewич Р.А., Спасенных М.Ю., Богданович Н.Н., Козлова Е.В., Габова А.В., Заграновская Д.Е., Карпов И.А., Беленькая И.Ю., Овчаренко Ю.В., Алексеев А.Д., Калмыков Г.А., Гутман И.С., Оксенойд Е.Е. Теплофизический каротаж на керне как новый метод исследований баженовской свиты при решении задач поиска, разведки и добычи углеводородов. Geomodel 2016 — 18th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development // База данных публикаций EAGE EarthDoc, 2017. DOI: 10.3997/2214-4609.201602175.
12. Попов Ю.А., Ромушкewич Р.А., Попов Е.Ю. Теплофизические исследования пород разреза Тюменской сверхглубокой скважины // Тюменская сверхглубокая скважина / Под ред. В.Б. Мазура. Пермь: Изд-во. КамНИИКИГС и ГНПП «Недра», 1996. С. 57–72.
13. Попов Ю.А., Чехонин Е.М., Паршин А.В., Попов Е.Ю., Миклашевский Д.Е. Новая аппаратно-методическая база тепловой петрофизики как средство повышения эффективности добычи тяжелых нефтей // Нефть, газ, новации. 2013. № 4. С. 52–58.
14. Asaad, Y. A study of the thermal conductivity of fluid bearing porous rocks. Phd Dissertation, Univ. of Calif. Berkeley, 1955.
15. Bayuk I., Ammerman M., Chesnokov E. Upscaling of elastic properties of anisotropic sedimentary rocks // Geophysical Journal International. 2008. N 172, P. 842–860 DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03645.x.
16. Brigaud F., Vasseur G. Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks // Geophysical Journal. 1989. N 98. P. 525–542.
17. Fuchs S., Schutz F., Förster H.-J., Förster A. Evaluation of common mixing models for calculating bulk thermal conductivity of sedimentary rocks: Correction charts and new conversion equations // Geothermics, 2013. N 47. P. 40–52.
18. Hantschel Th., Kauerauf A. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag, 2009. 476 p.
19. Lichteneker K. The thermal conductivity of granular materials. // Physikalische Zc. 1926. N 27. P. 115–118.
20. McKenna Th., Sharp J., Jr., Lynch F. Thermal conductivity of Wilcox and Frio sandstones in South Texas (Gulf of Mexico Basin) // AAPG Bulletin. 1996. N 80 (8). P. 1203–1215.
21. Midttomme K., Roaldset E., Agaard P. Thermal conductivity of selected clstones and mudstones from England // Clay Minerals. 1998. N 33. P. 131–145.

22. Попов Y., Beardsmore G., Clauser C., Roy S. ISRM Suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure // *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016. N 49(10). P. 4179–4207.
23. Попов Y., Parshin A., Al-Hinai S., Miklashevskiy D., Попов E., Dyshlyuk E., Chekhonin E., Safonov S., Khan R. Experimental investigations of reservoir thermal properties for heavy oil field in Oman with new methods and equipment. In: *Proceedings // The World Heavy Oil Congress*. New Orleans, USA, Louisiana, 2014. WHOC 14–258.
24. Попов Y., Pribnow D., Sass J., Williams C., Burkhardt H. Characterisation of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning // *Geothermics*, 1999, N 28, P. 253–276.
25. Попов Y., Tertychnyi V., Romushkevich R., Korobkov D., Pohl J. Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: experimental data // *Pure and Applied Geophysics*, 2003. N 160. P. 1137–1161.
26. Woodside, W., and J. H. Messmer. Thermal conductivity of porous media. II Consolidated rocks // *Journal of Applied Physics*. 1961. N 32 (9). P. 1688–1699.

УДК 550.831:550.348

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Ю.В. АНТОНОВ

Воронежский государственный университет

394006, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1; e-mail yuriyantono@yandex.ru

Неприливные вариации силы тяжести являются остаточной частью мониторинговых вариаций после вычитания из них лунно-солнечных вариаций силы тяжести и смещения нуля-пункта гравиметра. Неприливные вариации имеют иногда сложные морфологию и структуру. Источниками неприливных вариаций служат внутриземные процессы и потоки заряженных частиц в космосе. Потоки последних могут оказывать влияние на датчик гравиметра. Потоки заряженных частиц могут создать мощные магнитогидродинамические удары, которые вызывают аномальные изменения силы тяжести. Необходимо учитывать неприливные вариации при проведении высокоточных гравиметрических измерений.

Ключевые слова: неприливные вариации силы тяжести; лунно-солнечные вариации силы тяжести; скачки силы тяжести; аномальные колебания силы тяжести; потоки заряженных частиц.

ABNORMAL CHANGES OF THE NON-TIDAL VARIATIONS OF GRAVITY

YU.V. ANTONOV

Voronezh State University

394018, Russia, Voronezh, Universitetskaya pl., 1; e-mail: yuriyantono@yandex.ru

Non-tidal variations of gravity are the residual part of the monitoring of the variations after subtraction from them the lunar-solar gravity variations and the drift of the zero point of the gravimeter. Non-tidal variations are sometimes of complex morphology and structure. The sources of the non-tidal variations are the intracrustal processes and flows of the charged particles in space. The streams of the charged particles can affect the sensor of the gravimeter. The streams of the charged particles can create a powerful magnetic hydrodynamic (MHD) shocks that cause abnormal changes of gravity. It is necessary to consider the non-tidal variations when carrying out high-precision gravimetric measurements.

Keywords: non-tidal variations of gravity; lunar-solar variations of gravity; jumps of gravity; abnormal fluctuations of gravity; streams of the charged particles.

Мониторинговые наблюдения гравиметром SG—5 Autograv проведены на Геодинамическом полигоне РАН в г. Бишкек (Киргизстан). Гравиметр установлен в штольне с постоянной температурой около 8° С, примерно в 30 км от города, так что помехи техногенного характера практически

отсутствуют. Гравиметр, как любой измерительный прибор, имеет погрешности наблюдений. Конечно, при мониторинговых измерениях за счёт замкнутости пространства измерений и при сохранении в нём стабильности физических параметров влияние большинства погрешностей удастся свес-