

УДК 536.24.08

ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ¹

© 2023 г. И. М. Абдулагатов^{1, 2, *}, А. Э. Рамазанова¹¹Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал
Объединенного института высоких температур РАН, Махачкала, Россия²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия*E-mail: ilmutdina@gmail.com

Поступила в редакцию 20.08.2022 г.

После доработки 09.02.2023 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

Приведены новые экспериментальные термодинамически согласованные данные температурной зависимости температуропроводности, теплоемкости и рассчитанной на их основе теплопроводности ($\lambda = \alpha \rho C_p$) черного угля. Экспериментально исследовано влияние термического разложения (пиролиза) угля вблизи 700 К, испарения влаги и других легко летучих компонентов угля при 380 К на поведение теплоемкости и теплопроводности. Измерения проводились бесконтактным методом лазерной вспышки (Netzsch LFA 457) в интервале температур 301–823 К. По измеренным значениям температуропроводности черного угля исследован процесс переноса тепла в угольном пласте. Показано, что учет температурной зависимости температуропроводности среды при решении уравнения теплопереноса существенно влияет на распределение температуры в пласте.

DOI: 10.31857/S0040364423030018

ВВЕДЕНИЕ

Уголь является основным источником энергии в мире и одним из самых популярных видов энергетического топлива. Теплофизические свойства угля – температуропроводность, теплоемкость и теплопроводность – необходимы для моделирования процессов переноса тепла в угольных пластах. Тепловые характеристики угля зависят от многих факторов: температуры, состава, пористости, содержания влаги и др. На поведение теплофизических свойств сильно влияют такие физико-химические процессы, как пиролиз (термическое разложение длинных углеводородных цепочек на более простые за счет обрыва связей) и удаление летучих компонентов, образующихся в угле при нагревании. Точное описание данных процессов необходимо для понимания угольной технологии на разных ее этапах: от добычи угля до его конечного использования в промышленных печах, высокоинтенсивных камерах сгорания.

Распределение температуры в пластах зависит от теплофизических характеристик среды (температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности) и их температурных зависимостей, которые в настоящее время недостаточно изучены. Причина в том, что уголь является сложным веще-

ством и при его термическом разложении трудно выделить одно явление, чтобы изучить его отдельно. Для численного моделирования процессов теплопереноса в угольных пластах, т.е. решения системы дифференциальных уравнений теплового и энергетического баланса, необходимы точные экспериментальные данные о термодинамических и транспортных свойствах угля как функции температуры в широком диапазоне температур.

Цель данной работы – экспериментально исследовать температуропроводность и теплоемкость черного угля в широком интервале температур и на их основе с помощью решения уравнения теплопроводности с изменяющимися коэффициентами изучить процесс переноса тепла в угольном пласте.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Основные характеристики образца. Образец черного угля предоставлен лабораторией “Использование глубинного тепла Земли” университета Монаш, Мельбурн, Австралия, из шахты Аппин в бассейне Сиднея (проф. Ranjith). Плотность угля $\rho = 1.6 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ при 298.15 К, пористость – 5%, глубина залегания – 1500 м, влагосодержание – 3 мас. %, выход золы – 10 мас. %. Элементный химический анализ образца (таблица) проведен на EDX-детекторе (OmegaMax, FEI).

Метод измерения температуропроводности. Измерение температуропроводности черного угля

¹ По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.

Химический состав черного угля, %

C	O	H	N	S	Si	Al	Fe	K	Mn
79.65	9.350	5.130	1.470	0.347	2.475	1.043	0.295	0.229	0.011

проводилось бесконтактным методом лазерной вспышки с помощью прибора Netzsch LFA 457. Метод лазерной вспышки – абсолютный (без процедуры калибровки), он позволяет измерять истинную (присущую материалу) температуропроводность образца, обусловленную переносом тепла. При этом происходит отделение радиационной (фотонной) составляющей и учитываются тепловые потери для температуропроводности с использованием математической модели, заложенной в программное обеспечение. Метод имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными контактными методами: 1) отсутствует контактное сопротивление образца с термопарами и источником тепла, что увеличивает точность измерения теплового потока, проходящего через образец, и точность измерения температуропроводности; 2) упрощается подготовка образца с учетом его небольших размеров (6–25.4) мм; 3) время измерения занимает несколько секунд для одной температуры или несколько часов для полной температурной области исследования; 4) повышается точность измерения (от 2 до 3% для температуропроводности и 5% для теплопроводности); 5) увеличивается диапазон измерений температуропроводности ($0.1–2000 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$) и теплопроводности ($0.1–2000 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$); 6) исследованный образец можно использовать далее для измерения теплоемкости или температуропроводности другими методами.

Метод лазерной вспышки достаточно полно и подробно описан в литературе [1–8], а также в публикациях [9–12]. Данный метод успешно применен для измерения температуропроводности горных пород в [1, 2, 4–8] и изоляционных материалов в [3]. Погрешность измерения температуропроводности данным методом составляет 3%, что подтверждено в [13], а также в [14] на стандартном образце в интервале температур 293–973 К. Процедура измерения температуропроводности методом лазерной вспышки полностью удовлетворяет признанным во всем мире требованиям [15, 16].

Процесс измерения полностью автоматизирован и управляется программным обеспечением с использованием математической модели для подгонки кривой к сигналу детектора (T – τ -профиль). Измеренные данные анализируются с учетом тепловых потерь и эффектов конечных импульсов. Используются модель [17] при низких температурах (около комнатной температуры) и модель [18] при высоких температурах (выше 373 К). Для измерения применялся цилиндрический образец

угля высотой $h = 1.23$ мм, диаметром $d = 10$ мм. Плоскости образца отшлифованы параллельно друг другу с точностью до 0.05 мм. Полученная погрешность измерения температуропроводности с вероятностью 95% и коэффициентом охвата $k = 2$ составляет 3%. Измерения проводились в атмосфере азота.

Метод измерения изобарной теплоемкости. Изобарная теплоемкость того же образца черного угля измерена с использованием метода DSC 204 F1 сканированием со скоростью 10 град/мин (скорость нагрева) в атмосфере азота, погрешность измерения составила 2–3%. DSC – чувствительный метод, который позволяет исследовать структурные изменения при нагревании и их влияние на свойства материалов. Из полученных данных легко определить изменение энтальпии фазовых переходов. Подробно методика и процедура измерений описаны в [9–11, 19]. Данный метод успешно применен в работах [20, 21] для измерения температурной зависимости теплоемкости и температуропроводности резервуарных пород, насыщенных тяжелой нефтью.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описанный выше метод лазерной вспышки использован для измерения температуропроводности a и теплоемкости C_p в интервале температур от 301 до 823 К. Все измерения a и C_p проводились на сухом (осушение образца выполнялось при температуре 105°C), влажном и термически обработанном (после 850 К) образцах черного угля. Полученные экспериментальные значения температуропроводности угля показаны на рис. 1.

У углей, в отличие от твердых веществ, не содержащих органических соединений, насыщения температуропроводности не наблюдается, поскольку при высоких температурах происходят улетучивание и структурные изменения органических компонентов угля. Это приводит к росту температуропроводности угля при высоких температурах. При температуре около 485 К наблюдается минимум температуропроводности, который отсутствует у обычных твердых материалов. Как показал эксперимент, данные по температуропроводности угля для влажного и сухого образцов до и после температурного воздействия (теплового стресса) практически совпадают (расхождения в пределах экспериментальной погрешности). Для описания температурной зависимости температуропроводности угля $a(T)$ во всем диапазоне

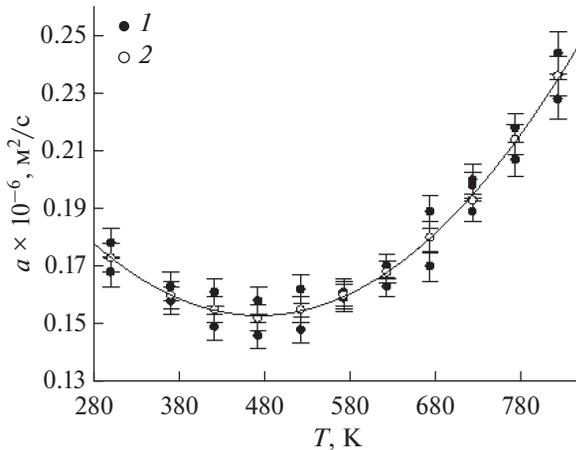


Рис. 1. Температуропроводность черного угля в зависимости от температуры при атмосферном давлении: 1 – прямой и обратный ход измерений для сухого и влажного образца; 2 – усредненные значения; сплошная кривая – результаты расчета по (1).

температур использовано простое полиномиальное уравнение второго порядка

$$a = A + BT + CT^2 \quad (1)$$

с коэффициентами $A = 0.306117 \text{ мм}^2/\text{с}$, $B = -6.46113 \times 10^{-4} \text{ мм}^2/(\text{с К})$, $C = 6.80700 \times 10^{-6} \text{ мм}^2/(\text{с К}^2)$, T в К. Коэффициент корреляции равен 0.998. Максимальное отклонение рассчитанных значений температуропроводности по (1) от экспериментальных во всем интервале температур составляет 0.9%, что значительно меньше экспериментальной погрешности температуропроводности (3%).

На рис. 2 представлены результаты измерений температуропроводности различных типов углей, полученные разными авторами вместе с данными настоящей работы, которые качественно хорошо согласуются с характерным минимумом $0.152 \text{ мм}^2 \text{ с}^{-1}$ около 485 К.

Измерения теплоемкости сухого и влажного образцов угля выполнены в интервале температур от 304.15 до 771.15 К. Результаты измерений до и после термической обработки при высоких температурах приведены на рис. 3. Поведение C_p (рис. 3а) указывает на влияние влагонасыщения и реакции пиролиза на температурное поведение теплоемкости, которое имеет сложный характер и сильно отличается в различных диапазонах температуры. На рис. 3а видны отчетливые изменения теплоемкости на разных стадиях нагрева, когда в порах угля происходят физико-химические процессы, которые по-разному влияют на его свойства. В начальном низкотемпературном диапазоне (до 380 К) теплоемкость угля быстро увеличивается с ростом температуры, проходит через максимум, затем резко падает при дальнейшем нагревании до 485 К, что связано с уменьшением

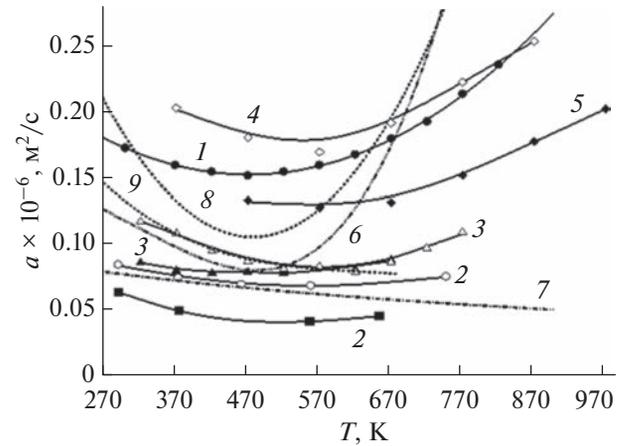


Рис. 2. Температуропроводность как функция температуры для различных типов углей: 1 – данная работа (черный уголь); 2 – [22] (из разных месторождений); 3 – [23] (из разных месторождений); 4 – [24] (черный уголь); 5 – [24] (бурый уголь); 6 – [25] (битуминозный уголь); 7 – [26] (битуминозный уголь); 8 – рассчитанные значения (черный уголь) [26]; 9 – [24], обобщенные результаты для различных типов угля из различных месторождений.

массы образца за счет выделения летучих веществ и испарения поровой (свободной) воды – основного источника потери массы в диапазоне температур 373–480 К. Для сухого образца максимум C_p значительно меньше и обусловлен испарением связанной воды в порах и удалением легколетучих компонентов угля (метан, этан, водород, азот и т.д.).

Подобная интерпретация поведения теплоемкости угля приведена в работе [27]. Аналогичное поведение C_p наблюдается и для горных пород, насыщенных тяжелыми углеводородами [9, 11, 12]. Выше 753 К теплоемкость угля монотонно возрастает и ее значения для влажных и сухих образцов угля почти совпадают, а при высоких температурах показывают одинаковое качественное температурное поведение C_p . Значительный рост теплоемкости выше 730 К в первую очередь связан с большой эндотермической теплотой карбонизации.

После термической обработки (стресса) температурное поведение C_p (рис. 3б) как для сухого, так и для влажного образцов практически не отличается, поскольку отжиг упорядочивает структуру угля. Все физико-химические процессы при высоких температурах в угле завершаются, т.е. при высокой температуре уголь претерпевает необратимые изменения, связанные с выходом летучих и разложением тяжелых компонентов.

Сравнение настоящих измерений $C_p(T)$ для черного угля со значениями из опубликованных работ для различных типов углей из разных месторождений показано на рис. 4.

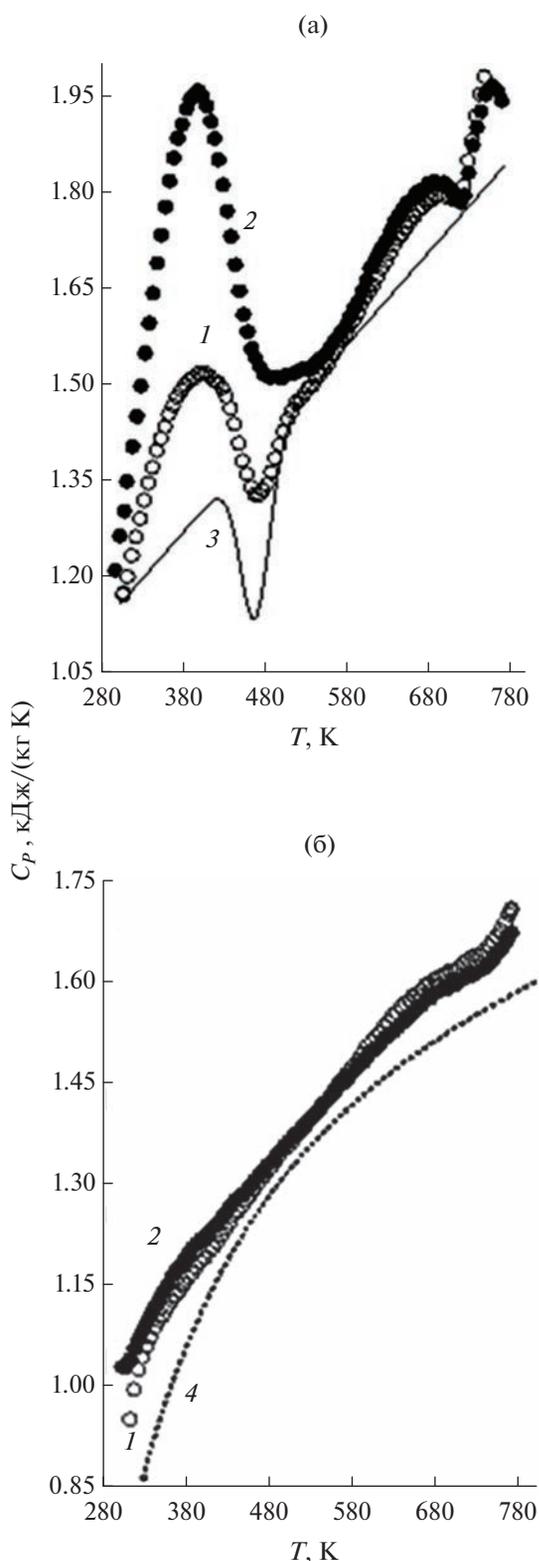


Рис. 3. Теплоемкость угля при прямом (а) и обратном (б) температурном ходе: 1 – сухой образец, 2 – влажный образец (данная работа); 3 – результаты расчета на основе корреляционной модели [27] для битуминозного угля; 4 – графит по данным [28].

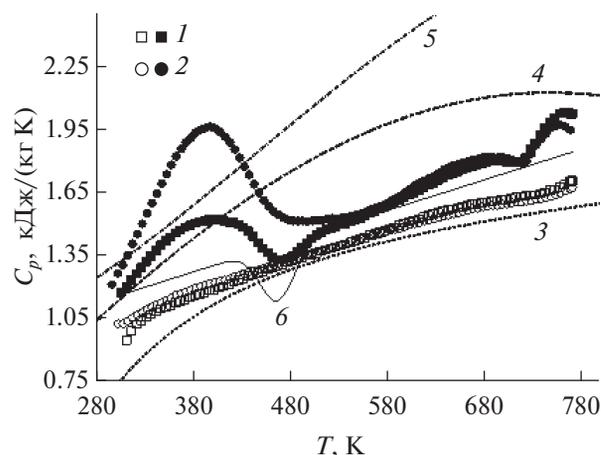


Рис. 4. Теплоемкость как функция температуры для различных типов углей: 1, 2 – сухой и влажный образцы до и после термообработки соответственно (данная работа); 3 – данные [28]; 4 – [29]; 5 – [30]; 6 – результаты расчета на основе корреляционной модели [27] для высоколетучих битуминозных углей.

На рис. 5 приведены рассчитанные значения теплопроводности из термодинамического соотношения $\lambda = a\rho C_p$ с использованием измеренных значений a , ρ , C_p для сухого, влажного и термически обработанного образцов черного угля. Из-за отсутствия данных о температурной зависимости плотности черного угля использовано значение $\rho = 1.6 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ при 298.15 К, что существенно не влияет на точность полученных значений теплопроводности. Температурный ход теплопроводности на рис. 5 отражает температурное поведение теплоемкости (рис. 3). Это означает, что при определении теплопроводности ($\lambda = a\rho C_p$) поведение теплоемкости доминирует над характером изменения теплопроводности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В ПЛАСТЕ

Как известно, процесс теплопереноса в пласте может быть представлен объединением законов Фурье и сохранения энергии [31]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla(-\lambda \nabla T) = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает процесс переноса тепла в угольном пласте, где материал пласта имеет теплоемкость C_p , температуропроводность a , теплопроводность λ и плотность ρ , которые являются функциями температуры. Большинство исследователей, которые занимаются моделированием процессов переноса тепла в нефтяных, угольных и геотермальных пластах, из-за отсутствия надежных экспериментальных данных по температурным зависимостям $a(T)$, $C_p(T)$ и $\lambda(T)$

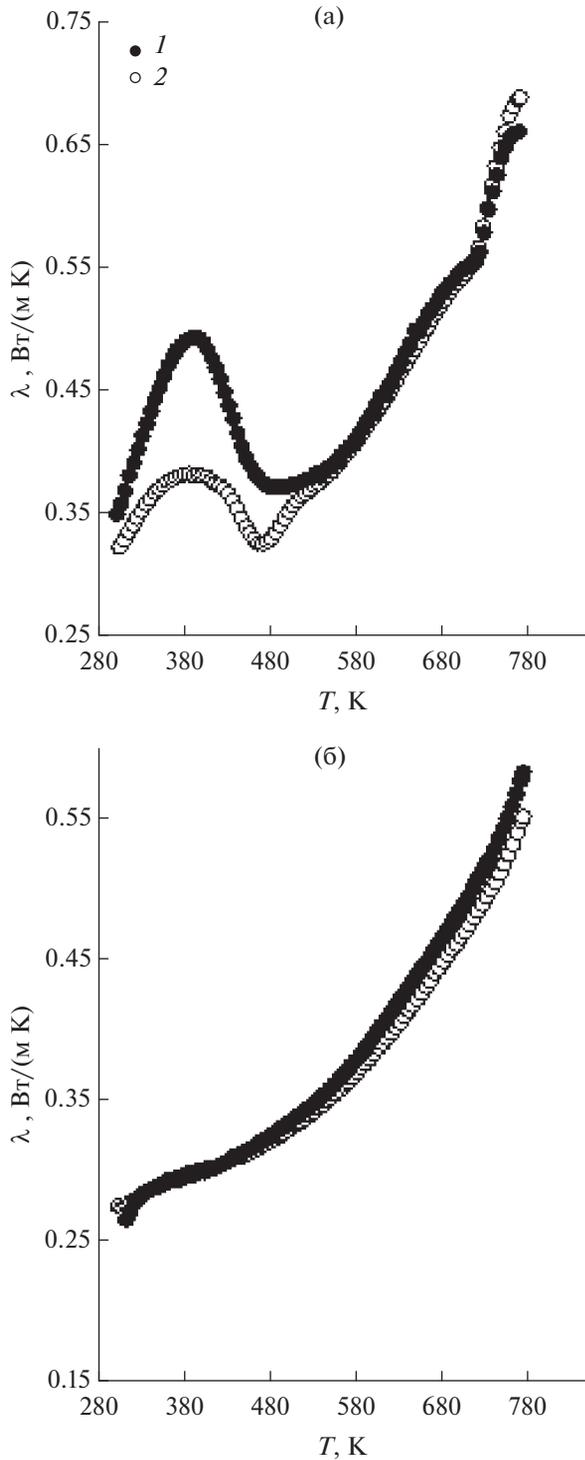


Рис. 5. Рассчитанные значения теплопроводности черного угля по экспериментальным данным температуропроводности, теплоемкости и плотности (данная работа): 1 – сухой образец, 2 – влажный образец; (а) – до термической обработки; (б) – после.

используют в уравнении (2) их постоянные значения (как правило, при комнатной температуре). Это приводит к неточности расчетов температур-

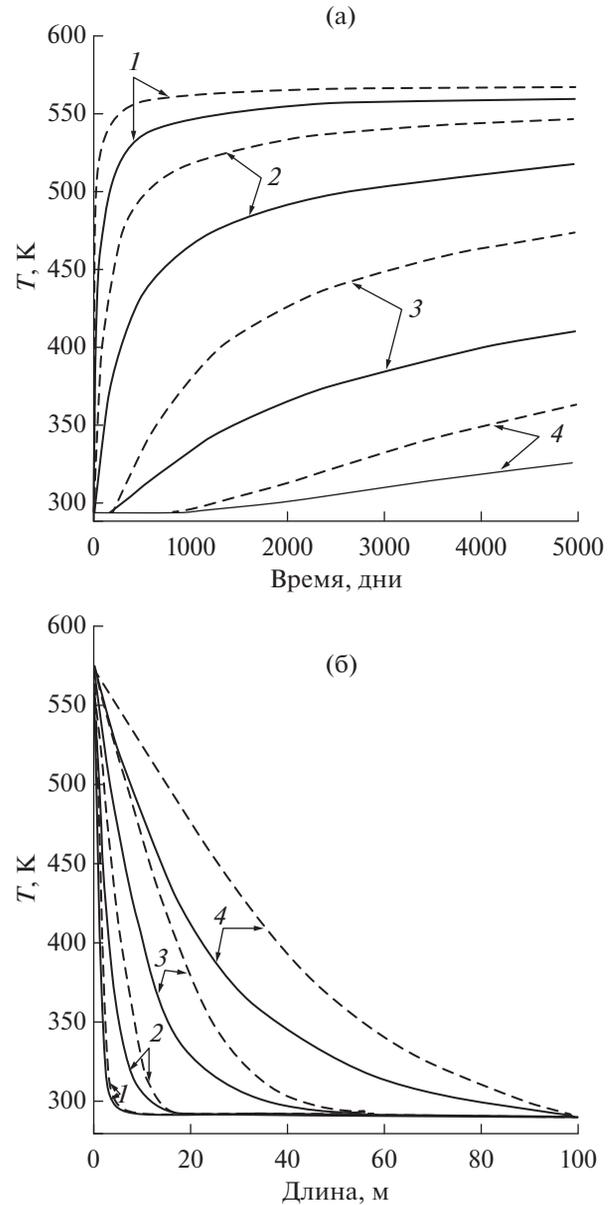


Рис. 6. Распределение температуры $T(x, \tau)$ в угольном пласте, когда температуропроводность постоянна (штриховые кривые) и зависит от температуры (сплошные кривые): (а) 1 – 1 м, 2 – 5, 3 – 20, 4 – 50; (б) 1 – 10 дней, 2 – 100, 3 – 1000, 4 – 5000.

ного профиля $T(x, \tau)$ пласта (распределения температуры в пласте). Для решения данного уравнения использовались измеренные в настоящей работе a , C_p и λ угля в зависимости от температуры, т.е. исследовался процесс переноса тепла в среде, где основные тепловые характеристики среды меняются с температурой.

Для простоты рассмотрен случай, когда распространение тепла во все направления симметрично одинаково. Тогда уравнение (2) можно представить в упрощенном одномерном виде

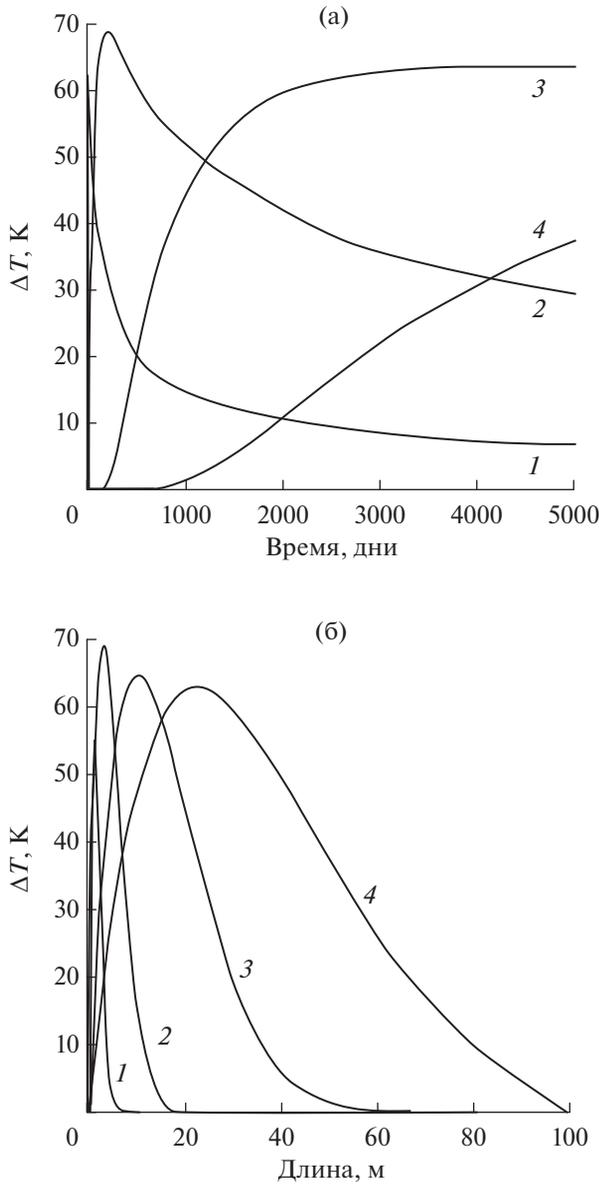


Рис. 7. Распределение разности температур $\Delta T(x, \tau)$ в угольном пласте: (а) 1 – 1 м, 2 – 5, 3 – 20, 4 – 50; (б) 1 – 10 дней, 2 – 100, 3 – 1000, 4 – 5000.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} - a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = 0, \quad (3)$$

где $a = \lambda / (\rho C_p)$ – функция температуры. Решение уравнения (3) позволяет определить температуру в различных точках пласта и в разное время, т.е. пространственное и временное распределения температуры – термодинамическую модель угольного пласта $T(x, \tau)$. Для проведения расчетов сделаны следующие предположения: 1) угольный пласт нагревается от постоянного источника тепла (например, пожар в шахте, закачка горячего пара и т.д.); 2) единственным механизмом передачи теп-

ла является кондуктивный; 3) пласт представляет собой однородную пористую среду.

Начальные и граничные условия выбраны в следующем виде:

$\tau = 0, T = T_0 = 293.15 \text{ К}, 0 \leq x \leq L (L = 100 \text{ м}), L$ – длина пласта;

1) $x = 0, T = T_{\text{ист}} = 573.15 \text{ К}, \tau > 0$ (источник тепла с постоянной температурой);

2) $x = L, T = T_L = 293.15 \text{ К}, \tau > 0$.

Уравнение (3) решалось с помощью программы COMSOL – мультифизическое моделирование. Рассмотрены два случая, когда температуропроводность является функцией температуры и $a = \text{const}$ (значение при комнатной температуре). Распределение температуры $T(x, \tau)$ по угольному пласту, рассчитанное по уравнению (3) для обоих случаев, приведено на рис. 6. Полученная разница ΔT между профилями $T(t, x)$ показана на рис. 7.

Разница в решениях уравнения (3) для обоих случаев существенная. В зависимости от координаты и времени максимальное расхождение достигает 70 К. Этот факт позволяет сделать вывод, что процесс переноса тепла в пласте зависит от изменяющихся тепловых характеристик среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены новые надежные экспериментальные данные по температуропроводности и теплоемкости черного угля в широком интервале температур (301.75–823.15 К). Обнаружены некоторые особенности поведения теплоемкости сухого, влажного и термически обработанного черного угля в различных температурных областях (низких, вблизи температуры кипения воды, и высоких, вблизи температуры разложения тяжелых углеводородов). На основе измеренных значений температуропроводности и теплоемкости рассчитана теплопроводность по соотношению $\lambda = \rho r C_p$. Полученные значения температуропроводности как функции температуры использованы для решения уравнения теплопереноса с переменными коэффициентами. Расчеты показали, что использование постоянного значения коэффициента температуропроводности вместо его температурной зависимости приводит к неточности в оценке пространственно-временного распределения температуры угольного пласта (до 70 градусов). Это влияет на понимание реальных термодинамических условий в пласте и, таким образом, зависимость свойств от температуры следует учитывать при моделировании глубинных процессов в угольном пласте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hofmeister A.M. Thermal Diffusivity of Garnets at High Temperature // Phys. Chem. Miner. 2006. V. 33. P. 45.

2. Hofmeister A.M. Inference of High Thermal Transport in the Lower Mantle from Laser-flash Experiments and the Damped Harmonic Oscillator Model // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2008. V. 170. P. 201.
3. Zhang L. Potential Assessment of CO₂ Injection for Heat Mining and Geological Storage in Geothermal Reservoirs of China // *Appl. Energy.* 2014. V. 122. P. 237.
4. Holt J.B. Thermal Diffusivity of Olivine // *Earth Planet. Sci.* 1975. V. 27. P. 404.
5. Buttner R., Zimanowski B., Blumm J., Hagemann L. Thermal Conductivity of a Volcanic Rock Material (Olivine–Melilitite) in the Temperature Range between 288 and 1470 K // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1998. V. 80. P. 293.
6. Degiovanni A., Andre S., Maillot D. Phonic Conductivity Measurement of a Semi-transparent Material // *Thermal Conductivity*. Ed. Tong T.W. Lancaster, PN: Technomic, 1994. V. 22. P. 623.
7. Popov Y.A., Pribnow D., Sass J.H., Williams C.F., Burkhardt H. Characterization of Rock Thermal Conductivity by High-resolution Optical Scanning // *Geothermics.* 1999. V. 28. P. 253.
8. Pertermann M., Whittington A.G., Hofmeister A.M., Spera F.J., Zayak J. Transport Properties of Low-sandine Single-crystals, Glasses and Melts at High Temperature // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2008. V. 155. P. 689.
9. Abdulagatov I.M., Abdulagatova Z.Z., Grigor'ev B.A., Kallaev S.N., Omarov Z.M., Bakmaev A.G., Ramazanova A.E., Rabadanov K.M. Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity of Oil Reservoir Rock at High Temperatures // *Int. J. Thermophys.* 2021. V. 42. P. 135.
10. Abdulagatov I.M., Abdulagatova Z.Z., Kallaev S.N., Bakmaev A.G., Ranjith P.G. Thermal-diffusivity and Heat-Capacity Measurements of Sandstone at High Temperatures Using Laser-Flash and DSC Methods // *Int. J. Thermophys.* 2015. V. 36. P. 658.
11. Abdulagatova Z.Z., Kallaev S.N., Omarov Z.M., Bakmaev A.G., Grigor'ev B.A., Abdulagatov I.M. Temperature Effect on Thermal-Diffusivity and Heat-Capacity and Derived Values of Thermal-conductivity of Reservoir Rock Materials // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources.* 2020. V. 6. P. 8.
12. Abdulagatov I.M., Abdulagatova Z.Z., Kallaev S.N., Bakmaev A.G., Omarov Z.M. Heat Capacity and Thermal Diffusivity of Heavy Oil Saturated Rock Materials at High Temperatures // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2020. V. 142 (1). P. 519.
13. Min S., Blumm J., Lindemann A. A New Laser-Flash System for Measurement of the Thermophysical Properties // *Thermochim. Acta.* 2007. V. 455. P. 46.
14. Vozar V., Hohenauer W. Uncertainty of Thermal Diffusivity Measurements Using the Laser-flash Method // *Int. J. Thermophys.* 2005. V. 26. P. 1899.
15. ASTM E1461-13 Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method, 2013.
16. ISO 22007-4:2008. Plastics-determination of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity. Part 4: Laser Flash Method, 2008.
17. Cowan R.D. Pulse Method of Measuring Thermal Diffusivity at High Temperatures // *J. Appl. Phys.* 1963. V. 34. P. 926.
18. Mehling H., Hautzinger G., Nilsson O., Fricke J., Hofmann R., Hahn O. Thermal Diffusivity of Semi-transparent Materials Determined by the Laser-flash Method Applying a New Analytical Model // *Int. J. Thermophys.* 1998. V. 19. P. 941.
19. Abdulagatov I.M., Abdulagatova Z.Z., Kallaev S.N., Bakmaev A.G., Omarov Z.M., Ranjith P.G. Heat-capacity Measurements of Sandstone at High Temperatures // *J. Zhao (Australia).* 2016. P. 493.
20. Абдулагатов И.М., Григорьев Б.А., Абдулагатова З.З., Каллаев С.Н., Бакмаев А.Г., Омаров З.М. Температуропроводность, теплоемкость и теплопроводность резервуарных пород // *Вести газовой науки. Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов.* М.: ВНИИГАЗ, 2021. № 1(46). С. 129.
21. Абдулагатов И.М., Григорьев Б.А., Абдулагатова З.З., Каллаев С.Н., Бакмаев А.Г., Омаров З.М. Экспериментальное исследование тепловых свойств (теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости) естественных резервуарных пород, насыщенных тяжелой нефтью // *Вести газовой науки. Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов.* М.: ВНИИГАЗ, 2022. № 4(49). С. 75.
22. Gu Y.-Q. Thermophysical Properties of Chinese Coals // *Science in China (Ser. A).* 1991. V. 34. P. 201.
23. Gosset D., Guillois O., Papoular R. Thermal Diffusivity of Compacted Coal // *Carbon.* 1996. V. 34. P. 369.
24. Il'chenko K.D., Revenko M.B. Thermophysical Properties of Ukraine Coals // *Metallurgy Thermal Engineering.* Dnepropetrovsk: NMAU, 2009. V. 1. P. 110.
25. Wen H., Lu J.-H., Xiao Y., Deng J. Temperature Dependence of Thermal Conductivity, Diffusivity and Specific Heat Capacity for Coal and Rocks from Coalfield // *Thermochim. Acta.* 2015. V. 619. P. 41.
26. Dindi H., Ba X.-H., Krantz W.B. Thermal and Electrical Property Measurements for Coal // *Fuel.* 1989. V. 68. P. 185.
27. MacDonald R.A., Callanan J.E., McDermott K.M. Heat Capacity of a Medium-volatile Bituminous Premium Coal from 300 to 520 K. Comparison with a High-volatile Bituminous Nonpremium Coal // *Energy & Fuels.* 1987. V. 1. P. 535.
28. Szarawa J. Heat Capacity of Coal Over a Wide Temperature Range // *Termodynamika Chemiczna.* Warszawa, 1969. P. 74.
29. Tomeczek J., Palugniok H. Specific Heat Capacity and Enthalpy of Coal Pyrolysis at Elevated Temperatures // *Fuel.* 1996. V. 75. P. 1089.
30. Leśniak B., Słupik Ł., Jakubina G. The Determination of the Specific Heat Capacity of Coal Based on Literature Data // *Chemik.* 2013. V. 67. P. 566.
31. Schloemer S., Teschner B., Poggenburg J., Seeger Ch. Gas and Temperature Monitoring of a Spontaneous Coal Fire in Wuda Coal Mining Area // *Report of Coal Fire Project Phase A. Part B: Innovative Technologies for Exploration, Extinction and Monitoring of Coal Fires in North China,* 2007.