

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГИДРОТЕРМАЛЬНО ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД В ОЧАГАХ РАЗГРУЗКИ ПАРОГИДРОТЕРМ

А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, Н.П. Богатко

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: avk@kscnet.ru*

На примере гидротермально измененных пород в очагах разгрузки парогидротерм Мутновского геотермального месторождения (23 цилиндрических образца) апробирована методика лабораторного определения петрофизических параметров моделей теплопереноса (плотность, пористость, теплопроводность и теплоемкость). Плотность и пористость определяются по стандартной методике и их значения используются при решении двухпараметрической обратной задачи уравнения нестационарной теплопроводности для оценивания коэффициента теплопроводности и теплоемкости. Решение обратной задачи осуществляется на основе вычислительного кода iTOUGH2. В качестве исходных наблюдаемых данных при решении обратной задачи используются осуществляемые Т-логгером записи изменения температуры на верхнем торце образца при включении теплового источника на нижнем торце.

Введение

Лабораторные измерения плотности, пористости и теплопроводности вулканогенно-осадочных пород проводились в Институте вулканологии ДВО РАН в 90-е годы прошлого века для исследования распределения теплового потока. По данным Ф.А. Яновского [3] теплопроводность вулканогенно-осадочных пород из керна скважин Камчатки изменяется от 1.0 до 2.4 Вт/м²С. При оценке геотермальных ресурсов Камчатки В.М. Сугробовым [8] удельная тепловая емкость флюидонасыщенных горных пород принималась равной 2.5-2.7 Дж/см³ °С по данным Циркуляра Геол. Службы США № 790 [4], хотя прямых измерений этого параметра на Камчатке не проводилось. Оценка геотермальных ресурсов, моделирование эксплуатации геотермальных месторождений, прогноз условий парогидротермальных взрывов и связанных с ними оползневых процессов в гидротермальных системах базируется на теплофизических и петрофизических параметрах моделей теплопереноса (плотность, пористость, теплопроводность и теплоемкость). Поэтому, в настоящее время возникла необходимость продолжить эти измерения, расширить список определяемых параметров (включив в их число теплоемкость) и диапазон типов горных пород (в том числе участки гидротермально измененных пород в очагах разгрузки гидротерм) - в связи с расширяющейся на Камчатке эксплуатацией геотермальных месторождений (в том числе Паужетского и Мутновского, с установленной мощностью 12.5 и 62 МВт, соответственно).

Отбор образцов

Во время полевого сезона в сентябре 2007 г. отобраны пробы гидротермально измененных пород на следующих участках Мутновского геотермального месторождения: 1. Верхне Мутновский участок, 2. Медвежьи источники, 3. Дачные источники, 4. Новые источники, образованные на Южном полигоне возвратной закачки в результате парогидротермального взрыва в июне 2003 г., 5. Донное поле кратера Мутновского вулкана.

Образцы отбирались в стандартный алюминиевый бокс с герметичной крышкой, в точке отбора измерялись температура и фиксировались координаты по GPS.



Рис. 1. Отбор образцов

Описание экспериментальной установки по нагреванию образца и методика оценки плотности и пористости горных пород

Для проведения нагревания образца с целью определения теплопроводности и теплоемкости собрана оригинальная установка, представляющая собой маломощный (10 Вт) источник тепла, на котором закреплен алюминиевый стакан $d=55\text{mm}$ $h=40\text{mm}$. В этот стакан, помещаются алюминиевые бюксы с образцами пород. Для улучшения теплового контакта, дно бюксов смазывалось теплопроводящей пастой **КПТ-8**. В центр образца на глубину 10 мм погружался термолггер **Hobo U12** [9], используемый для измерения температуры с точностью $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ по заданной программе. Измеренные показания температур, сохранялись в его встроенной памяти, затем через встроенный USB порт записывались в РС для последующей программной обработки полученных данных. Измерения проводились с интервалом записи температуры – 10 сек, при этом 10 мин. осуществлялось запись температур в фоновом режиме, затем 10 мин. осуществлялась запись прихода температурной волны при нагреве образца.

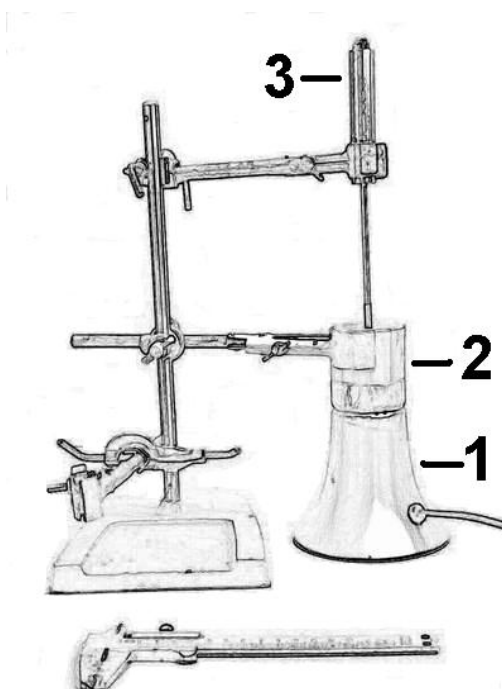


Рис. 2. Внешний вид установки по нагреванию образца для определения его теплопроводности и теплоемкости. (1 –нагреватель, 2- бюкс с образцом, 3 – термолггер)

Определение влажности, пористости и плотности образцов осуществлялась по методикам, утвержденным **ГОСТ 5180-84** [1].

1. Влажность образца (W), определяется как отношение массы воды удаленной из образца высушиванием до постоянной массы, к массе высушенного образца.

$$W = (m_1 - m_0) / (m_0 - m) \cdot 100\% \quad (1),$$

где m – масса бюкса, m_1 -масса влажного образца в бюксе, m_0 - масса высушенного образца в бюксе

2. Объемная плотность образцов в сухом состоянии (ρ) определялась по формуле:

$$\rho = (m_0 - m) / V \quad (2),$$

где $m_0 - m$ - масса образца, V - объем образца

3. Плотность скелета пород (ρ_R) – отношение массы твердых частиц к их объему, определялась пикнометрическим методом и вычислялась по формуле:

$$\rho_R = G_0 \cdot \rho_w / (G_0 + G_3 - G_2) \quad (3),$$

где G_0 - масса навески сухого образца, G_2 – масса пикнометра с водой и образцом после кипячения, G_3 – масса пикнометра с водой, ρ_w - плотность воды

4. Пористость (ϕ) вычисляется по формуле:

$$\phi = (\rho_R - \rho) / \rho_R \quad (4),$$

где ρ_R - удельный вес скелета, ρ - объемная плотность в сухом состоянии.

Численная модель и методика решения обратных задач для оценки теплопроводности и теплоемкости горной породы

Численная модель базируется на вычислительной программе TOUGH2 [5, 6, 7], разработанной для моделирования многомерных, неизотермических потоков многофазных, многокомпонентных флюидов в пористой и трещиноватой среде. Вычислительная сетка, использованная при моделировании показана на рис. 3. Реализованные в вычислительном коде TOUGH2 [5, 6, 7] и изложенные в работе [2] управляющие уравнения многокомпонентного многофазного теплопереноса (уравнения сохранения массы и энергии) в трещинно-пористой среде редуцируются применительно к эксперименту по нагреванию образца следующим образом.

1. Теплоперенос в образце рассматривается одномерным и включает только кондуктивную теплопроводность, т.е. потоковый член выглядит:

$$q_{\text{конд}} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (5),$$

где λ - коэффициент теплопроводности горных пород, $\text{grad } T$ - градиент температуры.

2. Флюид рассматривается однофазным (вода), т.е. аккумулятивный член $M^{(3)}$ в уравнении сохранения энергии записывается следующим образом:

$$M^{(3)} = (1 - \phi) \cdot \rho_R \cdot C_R \cdot T + \phi \cdot \rho \cdot h \quad (6),$$

где ϕ - пористость, ρ_R – удельный вес скелета горных пород, C_R - удельная теплоемкость скелета горных пород, T - температура, ρ - плотность воды, h - энтальпия воды.

Такая постановка задачи отвечает уравнению состояния, реализованному в модуле EOS1 вычислительного кода TOUGH2. Для оценивания параметров модели (λ - коэф-

фициент теплопроводности горных пород и C_R - удельная теплоемкость скелета горных пород) использовалась программа iTOUGH2.

iTOUGH2 – вычислительная программа, обеспечивающая решение обратных задач для программы TOUGH2 и оценку параметров модели путём автоматической калибровки TOUGH2- моделей по измеряемым данным. iTOUGH2 оценивает вектор параметров модели \mathbf{p} базируясь на векторе измеренных данных \mathbf{z}^* . Параметры модели оцениваются по измеренным данным путем минимизации меры сходимости (целевой функции S), зависящей от вектора невязок или «остатков» \mathbf{r} и весовой матрицы. Вектор невязок определяется как разность между вектором измеренных данных и вектором полученных на модели значений $\mathbf{z}(\mathbf{p})$.

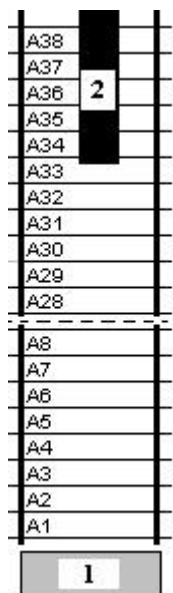


Рис. 3. Фрагмент вычислительной сетки, использованной для моделирования. (A1-A8----A38----(A99) – элементы сетки, 1- источник тепла (соответствует модельному элементу B1), 2 – зонд термолотгера (соответствует модельному элементу A36)

Параметризация модели экспериментального нагрева образца, оценка параметров и анализ ошибок

В рассматриваемом случае оцениваемыми параметрами модели являются λ - коэффициент теплопроводности горных пород и C_R - удельная теплоемкость скелета горных пород. Измеренными данными являются записи температур после включения источника тепла на нижнем торце образца в Т-логгере, погруженном на заданную глубину в верхний торец образца.

Обработка результатов измерений прохождения температурной волны через образец представляет собой процесс решения обратной двухпараметрической задачи теплопереноса, решение которой осуществлялось с использованием программы iTOUGH2. На рис. 4 показана сходимость результатов моделирования с измеренными опытными данными. На рис. 5 изображены невязки модельных и измеренных температур, невязки в целом не превышают 0.1°C (точность логгера Nobo U12) и не имеют существенной систематической составляющей, превышающей погрешность измерений (менее 0.01°C). Что свидетельствует, в целом, об адекватности принятой одномерной концептуальной модели теплопереноса, реальным условиям эксперимента. В результате решения обратной задачи, рассчитывались значения теплопроводности и теплоемкости образцов. Погрешность определения теплопроводности и теплоемкости оценивается на модели 0.8% и 0.4% соответственно.

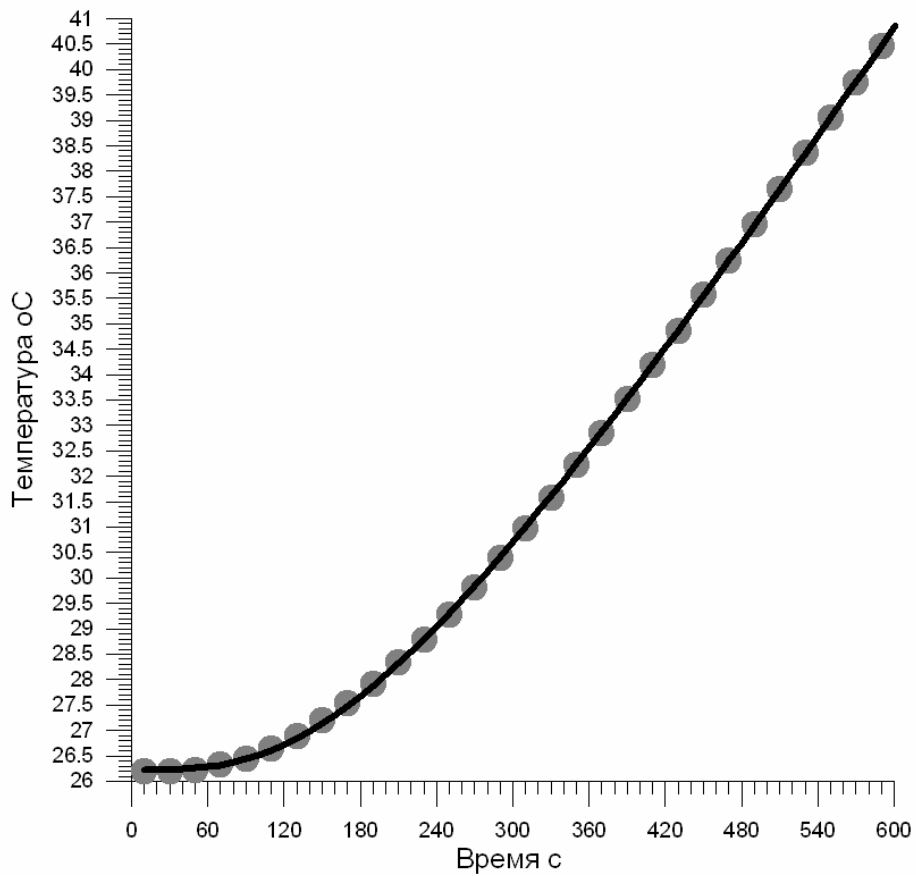


Рис. 4. Сходимость результатов моделирования (кружки) с экспериментальными данными (жирная линия) (образец N2007-10, испытания 15.02.2008)

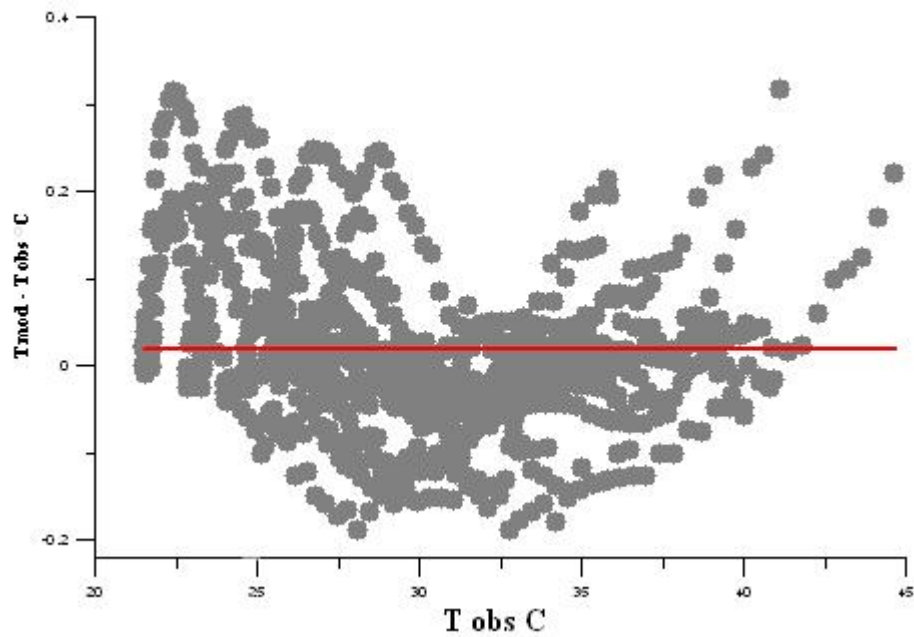


Рис. 5. Невязка между результатами моделирования и измеренными температурами ($T_{mod} - T_{obs}$) в зависимости от модельной температуры (T_{mod}) (по результатам испытаний 15-ти образцов.)

Таблица 1. Результаты определений петрофизических свойств горных пород в очагах разгрузки на Мутновском геотермальном месторождении

№ пробы	Место отбора	T °C	W %	ρ 10 ³ кг/м ³	ρ_R 10 ³ кг/м ³	ϕ	λ Вт/м °C	C_R кДж/кг °C
N2007-1	В-Мутновские (левый ручей)	98	20.9	1.15	2.62	0.59	0.75	1071
N2007-2	В-Мутновские (правый ручей)	94	18.3	0.90	2.75	0.55	0.99	1251
N2007-4	Медвежьи	71	18.4	0.91	2.70	0.57	0.88	1744
N2007-5	Медвежьи	68	19.5	1.08	2.67	0.59	0.42	1013
N2007-7	Медвежьи	97	16.7	1.10	2.15	0.51	0.72	1132
N2007-7*	Медвежьи	97	0				0.33	
N2007-8	Медвежьи	72	23.2	1.14	2.13	0.47	0.73	1000
N2007-8*	Медвежьи	72	0				0.66	
N2007-10	Дачные	68	13.2	1.08	2.29	0.53	0.69	919
N2007-10*	Дачные	68	0				0.74	
N2007-11	Дачные	95	13.7	1.27	2.12	0.40	0.74	625
N2007-11*	Дачные	95	0				0.89	
N2007-13	Дачные	98	17.1	1.28	2.03	0.37	0.62	642
N2007-13*	Дачные	98	0				0.45	
N2007-14	Дачные	85	13.9	1.13	2.64	0.58	0.56	1007
N2007-14*	Дачные	85	0				0.60	
N2007-16	Новые 2003	59	20.0	0.96	2.38	0.52	0.36	930
N2007-16*	Новые 2003	59	0				0.36	
N2007-17	Новые 2003	97	29.8	0.83	2.21	0.52	0.32	975
N2007-17*	Новые 2003	97	0				0.28	
N2007-19	Новые 2003	56	41.5	0.64	2.32	0.53	0.42	1839
N2007-19*	Новые 2003	56	0				0.44	
N2007-20	Новые 2003	85	33.3	0.87	2.18	0.47	0.73	1312
N2007-20*	Новые 2003	85	0				0.28	
N2007-22	Донное поле	37	20.0	1.02	2.09	0.53	0.56	849
N2007-22*	Донное поле	37	0				0.93	
N2007-23	Донное поле	74	18.9	1.06	2.12	0.50	0.47	662
N2007-23*	Донное поле	74	0				0.61	

Примечания к таблице: W – влажность горных пород %, ρ - объемная плотность горных пород 10³ кг/м³, ρ_R – удельный вес скелета горных пород 10³ кг/м³, ϕ - пористость, λ - коэффициент теплопроводности горных пород Вт/м °C, C_R - удельная теплоемкость скелета горных пород кДж/кг °C. * означает образцы после высушивания.

Заключение

На примере гидротермально измененных пород в очагах разгрузки парогидротерм Мутновского геотермального месторождения (23 цилиндрических образца) апробирована методика лабораторного определения теплофизических и петрофизических параметров моделей теплопереноса (плотность, пористость, теплопроводность и теплоемкость) в сочетании с обработкой результатов теплового эксперимента методами математического моделирования с использованием вычислительного кода iTOUGH2.

Средние значения оцениваемых параметров составили: объемная плотность горных пород от 0.64 до 1.28 кг/м³, удельный вес скелета горных пород от 2.03 до 2.75 кг/м³, пористость от 0.37 до 0.59, коэффициент теплопроводности горных пород от 0.28 до 0.99 Вт/м °C в естественном состоянии и от 0.28 до 0.93 Вт/м °C в сухом состоянии, удельная теплоемкость скелета горных пород от 625 до 1839 кДж/кг °C

Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 06-05-64688 и ДВО РАН по проекту 06-I-ОНЗ-109. Авторы также выражают признательность С.Г. Бильчинской и И.А. Рычке за техническую помощь в процессе выполнения исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 5180-84, Грунты, методы лабораторного определения физических характеристик. Госстандарт СССР. М. 1984. 24 с.
2. *Кiryukhin A.B.* Моделирование эксплуатации геотермальных месторождений // Дальнаука. 2002. 211 с.
3. *Яновский Ф.А.* О теплопроводности вулканогенно-осадочных пород Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1989. № 5. С. 77-84.
4. Assessment of geothermal resources of the United States, 1975. (Geol. Survey Circular #790).
5. *Finsterle S.* iTOUGH2 User's Guide // LBNL-40040. 1999. 130 p.
6. *Finsterle S.* iTOUGH2 Command Reference // LBNL-40041. 1999. 233 p.
7. *Pruess K.* TOUGH2 Users Guide, Version 2.0" // LBNL-43134. Nov. 1999.
8. *Sugrobov V.M.* Geothermal Resources of Kamchatka, Russia // in: Terrestrial Heat Flow and Geothermal Energy in Asia, M. Gupta and M. Yamano editors, Oxford & IBH Publishing Co. PVT. LTD.1995. P. 469-492/
9. Hobo U12, <http://www.onsetcomp.com/>

INVERSE MODELING APPLICATIONS TO ESTIMATION OF THE HEAT PROPERTIES OF THE ALTERATED ROCKS IN THE HYDROTHERMAL DISCHARGE AREAS

A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, N.P. Bogatko

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006;
e-mail: avk@kscnet.ru*

Samples collected on hydrothermal discharge areas of the Mutnovsky geothermal field used to develop method of estimation key heat and mass transfer parameters, such as grain density, porosity, heat conductivity and heat capacity (23 cylinders samples used). Grain density and porosity estimated based on standard method, and then used as input parameters for 2-parameters inverse problem targeted to estimate heat conductivity and heat capacity based on iTOUGH2 computer code modeling. Temperature records at the samples top, collected by HOBO loggers after heat source switch on at the sample bottom - used as observation data for inverse problem solution.