

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРОД ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ ОТ ВЛАЖНОСТИ И ПОРИСТОСТИ

А.Д. Дучков¹, Л.С. Соколова¹, С.В. Родякин^{1,2}, П.С. Черныш^{1,2}

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Анализируются результаты измерений теплопроводности, пористости и проницаемости образцов мезозойских осадочных пород из скважин, пробуренных в северо-восточной части Западно-Сибирской плиты и в Предьенисейском прогибе. Теплопроводность измерялась компаратором теплопроводности, при измерении пористости и проницаемости применялись стандартные методики. Всего измерена теплопроводность 135 образцов сухих пород (λ_c). 92 образца из этой коллекции были насыщены водой и повторно измерена их теплопроводность. В среднем теплопроводность сухих и водонасыщенных (λ_w) осадочных пород составляет 1.8—2.0 и 2.4—2.8 Вт/м·К соответственно. Коэффициент пористости (K_n) измерен для 95 образцов, а проницаемость ($K_{пр}$) — для 44 образцов. Сопоставление результатов измерений позволило выявить достаточно устойчивые линейные корреляционные связи между значениями теплопроводности сухих образцов с одной стороны и λ_w , K_n и $K_{пр}$ — с другой. Установленные зависимости предлагается использовать для экспрессной оценки тепловых (λ_w по λ_c и K_n) и структурных (K_n и $K_{пр}$ по λ_c) свойств осадочных пород. Очевидно, что выявленные корреляционные связи требуют дальнейшего уточнения.

Осадочные горные породы, теплопроводность, пористость, проницаемость, корреляционные связи, Западно-Сибирская плита.

THERMAL CONDUCTIVITY OF THE SEDIMENTARY-COVER ROCKS OF THE WEST SIBERIAN PLATE IN RELATION TO THEIR HUMIDITY AND POROSITY

A.D. Duchkov, L.S. Sokolova, S.V. Rodyakin, and P.S. Chernysh

We analyze the results of measurements of the thermal conductivity, porosity, and permeability of Mesozoic sedimentary rocks from wells drilled in the northeast of the West Siberian Plate and in the Cis-Yenisei basin. The thermal conductivity was measured by "Thermal-conductivity comparator", and the porosity and permeability were determined using standard techniques. A total of 135 samples of dry rocks were studied for thermal conductivity (λ_d). Ninety-two of them were then saturated with water, and their thermal conductivity was measured again. The average thermal conductivity of dry and water-saturated (λ_w) sedimentary rocks is 1.8–2.0 W/(m·K) and 2.4–2.8 W/(m·K), respectively. Porosity factor (K_{por}) was measured for 95 samples, and permeability (K_{perm}), for 44 samples. Comparison of the results of measurements revealed stable linear correlations between the thermal conductivity of dry samples and λ_w , K_{por} , and K_{perm} . The established dependences are proposed for the express evaluation of the thermal (λ_w from λ_d and K_{por} values) and structural (K_{por} and K_{perm} from λ_d values) properties of sedimentary rocks, though the revealed correlations need further refinement.

Sedimentary rocks, thermal conductivity, porosity and permeability of rocks, correlation, West Siberian Plate

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное изучение коэффициента теплопроводности (далее — теплопроводность) горных пород началось в середине прошлого столетия в связи с развитием геотермических исследований, ориентированных в основном на оценку плотности теплового потока (далее — тепловой поток), который рассчитывается по измерениям геотермического градиента в скважинах и теплопроводности (λ) горных пород, вскрытых этими скважинами. До настоящего времени не удалось разработать надежную аппаратуру для измерения тепловых свойств пород непосредственно в скважине [Новиков и др., 2008]. Поэтому вся информация об этом параметре основывается на изучении образцов горных пород в лабораторных условиях и последующем введении поправок, учитывающих различие лабораторных и пластовых условий.

Результаты измерений теплопроводности горных пород осадочного чехла Западно-Сибирской плиты, полученные в разных лабораториях, периодически обобщались в ряде монографических работ [Тепловое поле..., 1987; Курчиков, Ставицкий, 1987; Теплофизические свойства..., 1987; Балобаев,

1991; Гаврильев, 1998]. Это позволило при отсутствии необходимой экспериментальной информации пользоваться такого рода данными для оценки величины теплового потока. Наиболее эффективно использование этих справочных данных в случае магматических и метаморфических пород, которые характеризуются выдержанной теплопроводностью, зависящей в основном от минерального состава. Сложнее прогнозировать теплопроводность осадочных пород, которая определяется большим количеством факторов, включая пористость и тип флюида, заполняющего поровое пространство.

В лабораторных условиях в основном измеряется теплопроводность воздушно-сухих образцов пород (λ_c), которая удовлетворительно характеризует теплопроводность плотных пород с невысокой (0—5 %) пористостью (магматические, метаморфические породы, известняки, доломиты). Однако сухие образцы не позволяют правильно оценить реальную теплопроводность осадочных пород, в естественных условиях обычно полностью насыщенных водой (за исключением нефтегазоносных коллекторов, содержащих газ или смесь нефти с водой), причем степень насыщения определяется пористостью породы. Теплопроводность водонасыщенных осадочных пород (λ_b) может превышать λ_c на 30—40 %, что объясняется многократным различием теплопроводности воды и воздуха — 0.6 и 0.025 Вт/м/К соответственно. Отметим, кстати, что теплопроводность минерального скелета обычно составляет 2—3 Вт/м/К. Для определения λ_b приходится насыщать сухие образцы водой и повторять измерения. Процедуры же насыщения не просты, особенно когда мы имеем дело со слабосцементированными, слоистыми осадочными породами.

В этой связи остро встает вопрос о поисках корреляционных зависимостей, позволяющих, хотя бы и грубо, оценивать λ_b по λ_c или по другим параметрам осадочных пород (пористость, плотность и др.). К настоящему времени накоплено много данных о теплопроводности горных пород, однако не все они пригодны для поиска корреляционных связей. Большая часть измерений λ выполняется только на сухих образцах (например, [Попов и др., 1996]), используется разная измерительная аппаратура и разные процедуры насыщения образцов водой, в работах часто отсутствует информация о других свойствах пород (они не измеряются или не приводятся). Очевидно, что достоверные корреляционные связи могут быть получены лишь на всесторонне изученных коллекциях образцов, отобранных из одной геологической провинции и промеренных на однотипной аппаратуре.

Первые подобные исследования осадочных пород Западно-Сибирской плиты выполнены под руководством Ю.А. Попова [Роров et al., 2003; Попов и др., 2008]. Из керна скважин Широного Приобья и Ен-Яхинской сверхглубокой скважины (СГ-7) было отобрано и изучено порядка 600 образцов песчаников, алевролитов, базальтов из отложений мела, юры и триаса с глубины 1364—8247 м. Измерялась теплопроводность как сухих, так и водонасыщенных образцов, насыщение водой производилось в вакууме. Для тех же образцов определялись пористость и проницаемость. Все измерения теплопроводности выполнялись на приборе ИТС (измеритель теплопроводности сканирующий) [Попов и др., 1983]. Как правило, измерялись две главные компоненты тензора теплопроводности, ориентированные перпендикулярно (λ_{\perp}) и параллельно (λ_{\parallel}) слоистости. Предпочтение авторы отдавали λ_{\parallel} , предполагая, что на эту составляющую меньше влияет трещиноватость, возникающая, возможно, в результате декомпрессионного разуплотнения керна. В результате выявлены достаточно тесные линейные и экспоненциальные зависимости между λ_c , λ_b , λ_b/λ_c и пористостью. В качестве примера отметим зависимости:

$$\lambda_b/\lambda_c = 0.865 + 0.042 \cdot K_{\Pi}, \quad (1)$$

$$\lambda_b/\lambda_c = 0.95 + 0.027 \cdot K_{\Pi} \quad (R^2 = 0.72). \quad (2)$$

В (1), (2) и в последующих формулах: λ_c и λ_b — в Вт/м/К, R^2 — величина, характеризующая достоверность аппроксимации (в данном случае — линейной); K_{Π} в %. Зависимость (1) получена для коллекции образцов мезозойских песчаников и алевролитов, отобранных из керна скважин Широного Приобья (глубина 1968—3005 м) [Роров et al., 2003], а зависимость (2) — для коллекции образцов песчаников, алевролитов, туфов юрского и триасового возраста из керна Ен-Яхинской скважины (гл. 3627—8247 м) [Попов и др., 2008].

Нами получены новые данные о теплопроводности сухих (λ_c) и водонасыщенных (λ_b) образцов осадочных пород из керна скважин других районов Западно-Сибирской плиты. Эта информация сопоставляется в настоящей статье с пористостью и проницаемостью пород, а также с ранее рассмотренными зависимостями.

КОЛЛЕКЦИЯ ОБРАЗЦОВ, АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Авторами измерена теплопроводность 135 образцов пород из кернов семи скважин северо-восточной части Западно-Сибирской плиты (Медвежья-316, Сузунская-4, Горчинская-1, Южно-Носковская-318, Дерябинская-9) и двух скважин (Восток-1 и Восток-3) Предьенейского прогиба в юго-восточной части плиты. Сведения о литологии, пористости и проницаемости образцов, предоставленные

Таблица 1.

**Теплопроводность образцов пород из керна скважин северо-восточного
и юго-восточного районов Западно-Сибирской плиты**

№ п/п	Глубина, м	Порода	Теплопроводность, Вт/м/К		$\frac{\lambda_B}{\lambda_C}$	$K_{пр}, \%$	$K_{пр}, \text{мД}$	$\lg K_{пр}$
			λ_C	λ_B				
скв. Медвежья-316								
1	2200.5	Песчаники, J	1.5	2.35	1.57	—	—	—
2	2196.6	»	1.2	2.25	1.87	—	—	—
3	2191.6	»	1.45	2.8	1.93	—	—	—
4	2185.5	»	1.4	2.15	1.54	—	—	—
5	2182.5	Алевролиты, J	1.3	2.5	1.92	—	—	—
6	2173.6	Известняки, J	1.7	2.55	1.5	—	—	—
7	2075.3	Алевролиты, J	1.7	2.1	1.24	—	—	—
8	2072.1	»	1.8	2.2	1.22	—	—	—
скв. Сузунская-4								
9	4176.5	Песчаники, J	2.4	2.75	1.15	9.66	<0.001	-3
10	4174	Алевролиты, J	2.25	2.8	1.24	9.35	27.671	1.44
11	4162.9	»	2.25	2.65	1.18	6.09	0.308	-0.51
12	4051	»	2.2	2.8	1.27	8.69	0.056	-1.25
13	4048.5	Песчаники, J	1.95	2.65	1.36	8.68	<0.001	-3
14	4046.5	Алевролиты, J	2.3	3.2	1.39	7.64	<0.001	-3
15	4044.7	»	1.85	2.7	1.46	7.23	0.167	-0.78
16	3920.4	»	1.95	2.7	1.38	7.32	0.097	-1.01
17	3918.4	Песчаники, J	2.1	3.1	1.48	10.98	0.115	-0.94
18	3863.9	»	1.9	2.7	1.42	7.59	<0.001	-3
19	3861.6	»	1.90	2.8	1.47	10.26	<0.001	-3
20	3859.2	Алевролиты, J	1.75	2.65	1.52	8.04	<0.001	-3
21	3855.5	»	1.65	2.25	1.36	7.92	<0.001	-3
22	3852.7	Песчаники, J	1.9	2.75	1.45	9.74	<0.001	-3
23	3849.7	»	1.95	2.6	1.33	10.36	<0.001	-3
24	3847.6	Алевролиты, J	2.25	2.55	1.13	8.02	0.112	-0.95
25	3846.6	Песчаники, J	2.25	3.2	1.42	5.18	<0.001	-3
26	3845.6	Алевролиты, J	1.95	2.7	1.38	5.35	<0.001	-3
27	3841.8	Песчаники, J	1.8	2.7	1.5	9.19	<0.001	-3
28	3685.3	Алевролиты, J	1.5	2.2	1.47	6.12	5.297	0.72
29	3681.3	»	1.9	2.15	1.13	7.92	<0.001	-3
30	3675.2	»	2.3	2.5	1.09	5.56	<0.001	-3
31	3655.3	»	1.95	2.35	1.21	6.9	<0.001	-3
32	3653.7	»	2.3	2.7	1.17	5.49	<0.001	-3
33	3652	Песчаники, J	2.35	2.8	1.19	6.58	<0.001	-3
34	3527.7	»	2.55	3.1	1.21	10.3	0.166	-0.78
35	3525.8	Алевролиты, J	2.55	2.8	1.1	7.83	<0.001	-3
36	3523.6	»	2.4	2.9	1.21	8.56	<0.001	-3
37	3521.7	»	2.55	2.75	1.08	2.47	<0.001	-3
38	3434.3	Песчаники, J	2.55	3.1	1.22	7.07	<0.001	-3
39	3431.2	»	2	2.65	1.33	2.86	3.07	0.49
40	3426.2	Алевролиты, J	2.4	2.65	1.1	7.45	<0.001	-3
41	3424.1	»	2.0	2.5	1.25	5.52	<0.001	-3
42	3417.6	Песчаники, J	2.65	2.9	1.1	3.11	<0.001	-3
43	3410.7	Алевролиты, J	2.3	2.7	1.17	5.19	<0.001	-3
44	3407.1	Песчаники, J	2.55	3.2	1.25	8.35	<0.001	-3
45	3404.7	Алевролиты, J	2.3	2.9	1.26	7.67	0.085	-1.07

№ п/п	Глубина, м	Порода	Теплопроводность, Вт/м/К		$\frac{\lambda_b}{\lambda_c}$	$K_{пр}$, %	$K_{пр}$, мД	$\lg K_{пр}$
			λ_c	λ_b				
45	2674.9	»	1.8	2.5	1.39	9.63	0.222	-0.65
47	2671.2	»	2.1	2.3	1.1	7.95	<0.001	-3
скв. Южно-Носковская-318								
48	4199.5	Песчаники, J	2.3	3.1	1.35	—	—	—
49	4157.9	Алевроаргиллиты, J	1.6	2.25	1.41	—	—	—
50	4141.6	Алевролиты, J	1.75	3.2	1.83	—	—	—
51	4034	»	1.7	2.25	1.32	—	—	—
52	4022.3	»	1.7	2.6	1.52	—	—	—
53	4019.5	»	1.8	2.35	1.31	—	—	—
54	4007	»	2.1	2.7	1.29	—	—	—
55	4002.4	»	1.95	2.4	1.23	—	—	—
56	3995.3	»	2.2	2.5	1.14	—	—	—
57	3986.5	»	2.0	2.75	1.37	—	—	—
58	3602.5	Песчаники, К	1.65	2.5	1.51	—	—	—
59	3596	»	1.6	2.7	1.69	—	—	—
60	3425.8	Алевроаргиллиты, К	1.75	2.2	1.26	—	—	—
61	3418.3	Аргиллиты, К	1.5	1.95	1.3	—	—	—
62	3328.2	Алевролиты, К	1.95	2.4	1.23	—	—	—
63	3295.9	»	1.95	2.4	1.23	—	—	—
64	3095.7	»	1.95	2.5	1.28	—	—	—
65	2903.9	»	1.3	2.55	1.96	—	—	—
66	2902	»	1.4	2.55	1.82	—	—	—
67	2897	»	1.6	2.55	1.56	—	—	—
68	2622.8	»	1.4	2.45	1.75	—	—	—
69	2619.3	Песчаники, К	1.45	2.8	1.93	—	—	—
70	2605.9	»	1.5	2.7	1.8	—	—	—
71	2360.5	»	1.9	2.55	1.34	—	—	—
72	1825.8	»	1.55	2.4	1.55	—	—	—
73	1821.6	»	1.2	2.25	1.88	—	—	—
74	1810.8	»	2.05	3.1	1.51	—	—	—
75	1807.2	»	1.8	2.8	1.56	—	—	—
скв. Горчинская-1								
76	3495.2	Алевролиты, J	1.7	—	—	9.73	0.165	-0.78
77	3493.9	Аргиллиты, J	1.7	—	—	9.64	<0.001	-3
78	3490.7	Алевролиты, J	1.95	—	—	9.99	<0.001	-3
79	3488.2	»	1.8	—	—	10.25	6.595	0.82
80	3479.1	»	1.65	—	—	9.47	1.22	0.09
81	3476.8	Песчаники, J	1.85	—	—	12.46	0.124	-0.91
82	3473.8	»	2.05	—	—	12.22	0.122	-0.91
83	3471.1	Алевролиты, J	1.8	—	—	12.15	0.128	-0.91
84	3370.3	»	1.95	—	—	8.1	<0.001	-3
85	3365.8	»	1.65	—	—	8.1	0.03	-1.52
86	3360.2	»	2.05	—	—	7.36	<0.001	-3
87	2907.1	Песчаники, J	2.05	—	—	11.12	0.38	-0.42
88	2901.1	»	2.2	—	—	8.55	0.195	-0.71
89	2899.2	»	2.1	—	—	12.85	0.607	-0.22
90	2471.3	Алевроаргиллиты, J	1.95	—	—	6.82	0.218	-0.66
91	2469	»	1.8	—	—	5.19	6.771	0.83
92	2465.4	»	1.9	—	—	7.82	0.458	-0.34

№ п/п	Глубина, м	Порода	Теплопроводность, Вт/м/К		$\frac{\lambda_b}{\lambda_c}$	$K_{пр}$, %	$K_{пр}$, мД	$\lg K_{пр}$
			λ_c	λ_b				
93	2460	»	1.85	—	—	8.41	<0.001	-3
94	2455.2	»	1.85	—	—	7.02	0.548	-0.26
95	2249.6	»	1.95	—	—	9.45	<0.001	-3
96	2289.9	Алевроаргиллиты, К	1.6	—	—	14.86	5.375	0.73
97	2294	»	1.7	—	—	9.38	0.107	-0.97
98	2293.1	»	1.4	—	—	16.94	2.362	0.37
99	2240	»	1.5	—	—	17.58	1.491	0.17
100	2234.5	»	2.2	—	—	1.85	<0.001	-3
скв. Дерябинская-9								
101	3504.5	Аргиллиты, J	2.05/1.96	—	—	3.95	<0.001	-3
102	3459.6	»	2.05/1.9	—	—	1.53	0.574	-0.24
103	3453.3	»	1.95/1.8	—	—	3.73	0.076	-1.12
104	3361	»	2.15/1.94	—	—	2.79	0.446	-0.35
105	2663.5	Алевролиты, J	1.85/2.14	—	—	8.5	<0.001	-3
106	2286.4	»	1.6/1.71	—	—	14.33	0.773	-0.11
107	2283.4	Алевролиты, К	1.53/1.73	—	—	12.02	<0.001	-3
108	2280.6	»	1.7/1.72	—	—	8.71	<0.001	-3
109	2276.5	»	1.5/1.56	—	—	13.86	1.113	0.05
скв. Восток-1								
110	2058.2	Песчаники, J	0.6	1.6	2.67	28.33	1117	3.05
111	2066.9	Алевролиты, J	0.9	1.85	2.06	29.12	72.64	1.86
112	2071.6	Песчаники, J	0.8	1.7	2.12	28.42	216.04	2.33
113	2126.9	Аргиллиты, J	1.5	1.8	1.2	12.79	<0.001	-3
114	2298.7	Песчаники, J	1.5	2.4	1.6	13.89	0.15	-0.82
115	2317.1	»	1.5	2.55	1.7	18.76	7.53	0.88
116	2616.6	»	1.6	2.45	1.53	20.26	64.46	1.81
117	2678.9	»	1.6	2.6	1.62	18.07	26.96	1.43
118	2744.45	»	1.4	2.45	1.75	22.57	440.64	2.64
119	2759.1	Алевролиты, J	2	—	—	12.31	1.55	0.19
скв. Восток-3								
120	2258.4	Песчаники, J	1.5	—	—	14.41	0.33	-0.48
121	2471.8	Алевролиты, J	2.1	2.45	1.17	7.6	0.02	-1.7
122	2520.4	Песчаники, J	1.3	2.2	1.69	20.73	0.9	-0.05
123	2528.5	»	1.4	2.3	1.64	20.07	6.79	0.83
124	2806.2	»	1.85	2.55	1.38	16.54	10.92	1.04
125	3067.5	»	1.9	2.55	1.34	15.58	14.46	1.16
126	3184.1	»	2.1	3.1	1.48	15.5	29.79	1.47
127	3253.1	Алевролиты, J	2.3	—	—	10.79	<0.001	-3
128	3266.8	Песчаники, J	2.2	—	—	11.5	0.22	-0.66
129	3283.6	»	2	—	—	14.27	0.62	-0.21
130	3395.5	Песчаники, PZ	2.6	—	—	0.5	—	—
131	3559.7	»	2.7	—	—	0.1	—	—
132	3746.9	Известняки, PZ	3.2	—	—	0.1	—	—
133	3808.9	»	2.8	—	—	0.1	—	—
134	4003	»	3	—	—	0	—	—
135	4104.3	»	3.1	—	—	0	—	—

Примечание. По скв. Дерябинской-9 в столбце λ_c приведены: над чертой — результаты измерений на компараторе теплопроводности (среднее значение $\lambda_c = 1.82$ Вт/м/К); под чертой — результаты измерений на ИТС (среднее значение $\lambda_c = 1.79$ Вт/м/К).

лабораторией седиментологии ИНГГ СО РАН, приведены в табл. 1. Основу коллекции (130 образцов) составляют песчаники и алевролиты из юрских и меловых отложений с коэффициентом пористости от 1.5 до 29 %. Пористость заметно уменьшается с глубиной: от 16—18 до 7—9 % в интервале 2—4 км. В коллекцию входят также пять образцов песчаников и известняков из палеозойского фундамента (скв. Восток-3). Эти породы характеризуются крайне низкой пористостью ($K_{п} = 0—1 \%$). Коллекция охватывает часть разреза от 1800 до 4200 м.

Для измерений теплопроводности использовался прибор «Компаратор теплопроводности», разработанный А.Н. Калининым в СибНИИ метрологии [Калинин и др., 1983]. Реализованный в приборе метод основан на двухточечном тепловом зондировании исследуемого образца двумя термозондами, между верхними концами которых с помощью термоэлектрической батареи создается и поддерживается постоянная разность температур ($\sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$). О теплопроводности исследуемого образца судят по величине термоЭДС дифференциальной термопары, регистрирующей разность температур между нижними концами термозондов при их контакте с поверхностью образца. Метрологический контроль качества измерений обеспечивается при помощи специального комплекта эталонов с известной теплопроводностью: пенополистирол ПС-100, $\lambda = 0.042 \text{ Вт/м/К}$; органическое стекло, $\lambda = 0.195 \text{ Вт/м/К}$; стекло ТФ-1, $\lambda = 0.696 \text{ Вт/м/К}$; стекло К-8, $\lambda = 1.081 \text{ Вт/м/К}$; плавный кварц марки КВ, $\lambda = 1.335 \text{ Вт/м/К}$; образец белого мрамора, $\lambda = 2.86 \text{ Вт/м/К}$; титановый сплав ВТ-6, $\lambda = 6.622 \text{ Вт/м/К}$; нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, $\lambda = 14.74 \text{ Вт/м/К}$. Подобный широкий набор эталонов обеспечивает измерение теплопроводности в диапазоне 0.05—15 Вт/м/К с погрешностью $\pm(5—6) \%$. Измерения выполняются без разрушения целостности образца (достаточно пришлифовать одну из поверхностей или ее часть). На данном приборе можно измерять теплопроводность как сухих, так и водонасыщенных образцов, размер которых превышает $30 \times 30 \times 10 \text{ мм}$. По метрологической обеспеченности тепловой компаратор близок к ранее упоминавшемуся прибору ИТС. Примерно одинакова для данных приборов и глубина проникновения теплового сигнала в породу (порядка 10 мм). Все это позволяет более обоснованно сравнивать результаты, полученные этими приборами. Это подтверждено измерениями сухих образцов из скв. Дерябинская как компаратором теплопроводности, так и ИТС. Оба прибора показали одинаковые значения теплопроводности (см. табл. 1).

Изученные нами образцы представляли собой стандартные керны — цилиндры с пришлифованными торцами, вырезанные из полноразмерного керна перпендикулярно его оси (параллельно слоистости) и имевшие диаметр и высоту порядка 37—38 мм. Теплопроводность всех образцов сначала измерялась в сухом состоянии (λ_c). Затем часть коллекции (92 образца) насыщали водой и измеряли их теплопроводность уже в водонасыщенном состоянии (λ_b). Насыщение образцов осуществляли в лаборатории седиментологии ИНГГ СО РАН по стандартной методике под вакуумом. После насыщения образцы помещали в сосуд с водой, откуда извлекали для проведения измерений. Во время измерений датчик теплового компаратора устанавливался на торцах образца. Как правило, производилось по 3—4 измерения теплопроводности на каждом из торцов при разных положениях датчика. Результаты измерений усреднялись. Так как при перемещении датчика тепловое зондирование производилось как параллельно, так и перпендикулярно слоистости породы, то среднее значение в данном случае нельзя отнести к какой-либо из компонент тензора теплопроводности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Общая характеристика. Результаты измерений суммированы в табл. 1. Теплопроводность сухих осадочных пород изменяется от 0.6 до 2.8 Вт/м/К, среднее значение составляет 1.8—2.0 Вт/м/К. Отчетливо проявляется возрастание λ_c с глубиной (от 1.1—1.3 на глубине 2 км до 2.1—2.3 Вт/м/К на глубине 4 км), что объясняется ранее отмеченным уменьшением пористости пород с глубиной.

Теплопроводность водонасыщенных мезозойских пород (λ_b) в целом заметно выше. Она изменяется от 1.5 до 3.2 Вт/м/К, а среднее значение составляет 2.4—2.8 Вт/м/К. Необходимо отметить, что в среднем λ_b на 30—40 % выше λ_c . Столь же значительной может быть ошибка при оценке теплопроводности геологического разреза или величины теплового потока при использовании значений λ_c вместо λ_b . Ранее это отмечалось в работе [Дучков и др., 2013]. Теплопроводность водонасыщенных пород также увеличивается с глубиной, однако заметно медленнее: от 2.1—2.4 Вт/м/К на глубине 2 км до 2.5—2.8 Вт/м/К на глубине 4 км. Очевидно, что и в данном случае увеличение λ_b связано с уменьшением пористости пород с глубиной. Насыщение образцов водой ведет не только к увеличению их теплопроводности, но и к относительному выравниванию ее значений.

Используя сведенные в табл. 1 измеренные значения параметров, рассмотрим наличие корреляционных связей между ними.

Корреляция значений λ_c и λ_b . Прямое сопоставление λ_c и λ_b приводит к достаточно тесной положительной корреляционной зависимости (рис. 1):

$$\lambda_b = 1.52 + 0.564 \lambda_c \quad (R^2 = 0.51). \quad (3)$$

Некоторые статистические данные, характеризующие зависимость (3), приведены в подрисуночной подписи.

Разброс точек корреляционного поля связан с влиянием на теплопроводность, кроме минерального состава, большого количества структурно-текстурных особенностей: изменения пористости, степени дисперсности, окатанности и отсортированности зерен, способа их укладки, типа цементирующего вещества, типа флюида, заполняющего поры. Учесть все это множество факторов возможно только при специальном довольно сложном экспериментальном исследовании. В данной работе мы рассматриваем только влияние наиболее важных для осадочных пород факторов, а именно пористости и типа флюида (воздух, вода).

Корреляция теплопроводности и пористости. Как уже отмечалось, теплопроводность сухих осадочных пород определяется в основном величиной пористости ($K_{п}$). Между этими параметрами обычно наблюдается обратная корреляция, более тесная, если λ_c и $K_{п}$ измеряются на одних образцах. На это обращалось внимание в работах [Роров et al., 2003; Попов и др., 2008]. Очевидно, что эффект минерального состава на теплопроводность сухих пород незначителен.

На рис. 2 показано поле корреляции и график линейной регрессии между λ_c и $K_{п}$ по нашим данным (см. табл. 1). Уравнение регрессии имеет вид

$$\lambda_c = 2.45 - 0.052 K_{п} \quad (R^2 = 0.56). \quad (4)$$

Пористость осадочных пород в нашей коллекции изменяется от 0.1 % (песчаники PZ) до 29 % (алевролиты J). Больше всего измерений $K_{п}$ выполнено в диапазоне 5—15 %. Для этого интервала характерен и наибольший разброс измеренных значений λ_c .

Формулы (3), (4) можно использовать для приближенной оценки теплопроводности водонасыщенных образцов по значениям λ_c или даже только $K_{п}$, если непосредственные измерения λ_b выполнить невозможно по каким-либо причинам.

Корреляция между значениями теплопроводности и пористости для водонасыщенных пород намного слабее, так как в данном случае контраст теплопроводности матрицы породы и заполняющего флюида много меньше, чем в сухих породах:

$$\lambda_b = 2.95 - 0.032 K_{п} \quad (R^2 = 0.34). \quad (5)$$

По формулам (4) и (5) можно оценить теплопроводность матрицы породы (λ_m), задавая $K_{п} = 0$. В породах нашей коллекции λ_m составляет 2.5—3 Вт/м/К, т.е. порядка теплопроводности плотных палеозойских известняков из скв. Восток-3 (см. табл. 1).

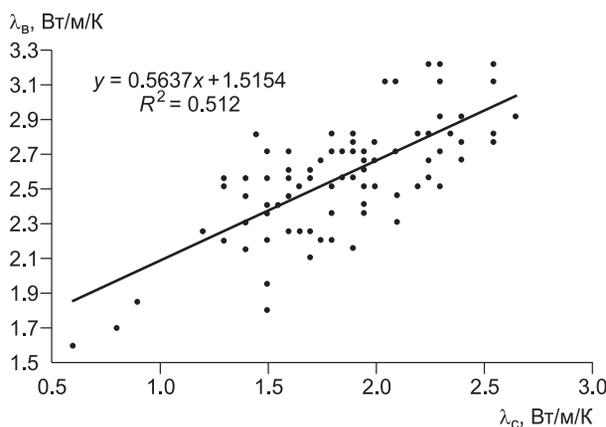


Рис. 1. Линейная корреляционная зависимость между измеренными значениями теплопроводности сухих (λ_c) и насыщенных водой образцов (λ_b).

Число пар значений — 90 (см. табл. 1). Уравнение регрессии: $\lambda_b = 1.52 + 0.56 \lambda_c$ ($R^2 = 0.51$). Коэффициент корреляции 0.65, среднее квадратичное отклонение отдельных значений λ_b от линии регрессии 0.26 Вт/м/К. Здесь и на других рисунках R^2 — параметр, характеризующий достоверность аппроксимации.

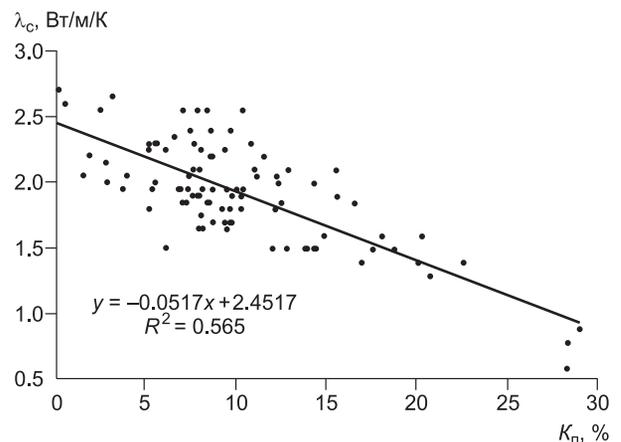


Рис. 2. Линейная корреляционная зависимость между измеренными значениями теплопроводности сухих образцов (λ_c) и их пористости $K_{п}$.

Число пар значений — 95 (см. табл. 1). Уравнение регрессии: $\lambda_c = 2.45 - 0.052 K_{п}$ ($R^2 = 0.56$). Коэффициент корреляции 0.75, среднее квадратичное отклонение отдельных значений λ_c от линии регрессии 0.35 Вт/м/К.

Как уже отмечалось, для характеристики теплопроводности водонасыщенных пород ранее предлагалось использовать корреляционную связь между отношением λ_b/λ_c и $K_{пр}$ (формулы (1—2)) [Роров et al., 2003; Попов и др., 2008]. Достаточно тесная корреляционная связь между этими параметрами для нашей коллекции показана на рис. 3. Уравнение регрессии имеет вид

$$\lambda_b/\lambda_c = 1.0 + 0.037 \cdot K_{пр} \quad (R^2 = 0.69). \quad (6)$$

Полученную зависимость можно использовать для оценки теплопроводности насыщенных водой осадочных пород при наличии измеренных значений λ_c и $K_{пр}$. Очевидно, что уравнение (6) достаточно хорошо соответствует уравнениям (1), (2), полученным ранее для коллекций пород из других районов Западно-Сибирской плиты.

Корреляция теплопроводности и проницаемости. Известно, что между пористостью и проницаемостью осадочных пород существует корреляционная связь. Соответственно должна существовать корреляционная связь между теплопроводностью и проницаемостью, что подтверждено в работе [Роров et al., 2003]. В этой работе измерялись λ_b и λ_c и сравнивались значения λ_b/λ_c и $K_{пр}$ для 60 образцов алевролитов и аргиллитов из керна скважин Широкого Приобья. В результате было установлено близкое к линейному увеличение λ_b/λ_c от 1.3 до 2.3 при возрастании проницаемости от 0.03 до 100 мД (уравнение корреляции в работе не приведено).

Мы проверили существование корреляционных связей между λ_c , λ_b/λ_c и $K_{пр}$, используя имеющиеся у нас данные. Сведения о проницаемости пород приведены в табл. 1. В нашей коллекции она изменяется в более широком диапазоне — от < 0.001 до 1117 мД. При проведении корреляции мы исключили значения $K_{пр} < 0.001$ (плохо проницаемые породы). Для представления $K_{пр}$ в связи с существенным разбросом значений использована логарифмическая шкала (значения $\lg K_{пр}$ также приведены в табл. 1).

Обратная линейная корреляционная связь между λ_c и $K_{пр}$ для 44 образцов показана на рис. 4. По существу она аналогична связи λ_c с $K_{пр}$. При увеличении пористости и проницаемости в сухой породе увеличивается количество воздуха, плохо проводящего тепло, и, соответственно, уменьшается эффективная теплопроводность образца. Уравнение регрессии имеет вид

$$\lambda_c = 1.79 - 0.24 \cdot \lg K_{пр} \quad (R^2 = 0.46), \quad (7)$$

где $K_{пр}$ — в мД.

По меньшему количеству данных (26 образцов) рассмотрена корреляционная связь между изменениями теплопроводности пород после их насыщения водой (параметр λ_b/λ_c) и проницаемостью. В результате получена положительная линейная зависимость, уравнение которой имеет вид

$$\lambda_b/\lambda_c = 1.45 + 0.18 \cdot \lg K_{пр} \quad (R^2 = 0.49). \quad (8)$$

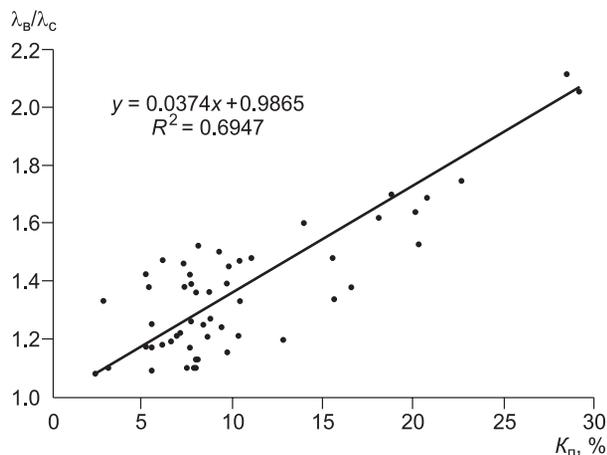


Рис. 3. Линейная корреляционная зависимость между измеренными значениями отношения теплопроводности водонасыщенных и сухих образцов (λ_b/λ_c) и их пористости.

Число пар значений — 54 (см. табл. 1). Уравнение регрессии: $\lambda_b/\lambda_c = 1.0 + 0.037 \cdot K_{пр} \quad (R^2 = 0.69)$.

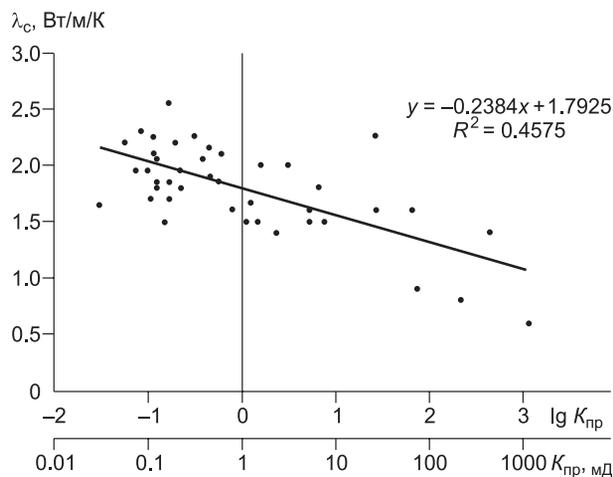


Рис. 4. Линейная корреляционная зависимость между измеренными значениями теплопроводности сухих образцов (λ_c) и их проницаемостью ($\lg K_{пр}$).

Число пар значений — 44 (см. табл. 1). Уравнение регрессии: $\lambda_c = 1.79 - 0.24 \cdot \lg K_{пр} \quad (R^2 = 0.46)$.

Таблица 2. Измеренные и рассчитанные по формулам (3), (5), (6) значения теплопроводности образцов водонасыщенных пород из мезозойских отложений, вскрытых скважинами Восток-1 и Восток-3

№ п/п	Глубина отбора, м	$K_{п}$, %	Теплопроводность, Вт/м/К				
			λ_c	λ_b	λ_b^*	λ_b^{**}	λ_b^{***}
Восток-1							
1	2058.2	28.33	0.6	1.6	1.8	2	1.3
2	2066.9	29.12	0.9	1.85	2.0	2	1.9
3	2071.6	28.42	0.8	1.7	2.0	2	1.6
4	2126.9	12.79	1.5	1.8	2.4	2.5	2.2
5	2298.7	13.89	1.5	2.4	2.4	2.5	2.3
6	2317.1	18.76	1.5	2.55	2.4	2.3	2.5
7	2616.6	20.26	1.6	2.45	2.4	2.3	2.8
8	2678.9	18.07	1.6	2.6	2.4	2.4	2.7
9	2744.45	22.57	1.4	2.45	2.3	2.2	2.6
Восток-3							
10	2471.8	7.6	2.1	2.45	2.7	2.7	2.7
11	2520.4	20.73	1.3	2.2	2.2	2.3	2.3
12	2528.5	20.07	1.4	2.3	2.3	2.3	2.4
13	2806.2	16.54	1.85	2.55	2.6	2.4	3.0
14	3067.5	15.58	1.9	2.55	2.6	2.4	3.0
15	3184.1	15.5	2.1	3.1	2.7	2.5	3.3
Среднее				2.33	2.35	2.32	2.44

Примечание. λ_c и λ_b — измеренные значения теплопроводности (см. табл. 1); λ_b^* , λ_b^{**} и λ_b^{***} — значения теплопроводности, рассчитанные по формулам (3), (5) и (6) соответственно.

Таким образом, по нашим данным, λ_b/λ_c увеличивается при изменении проницаемости значительно медленнее, чем указано в работе [Popov et al., 2003] — от 1.2 до 1.9 при росте $K_{пр}$ от 0.03 до 100 мД.

Примеры оценок теплопроводности водонасыщенных пород. Выше неоднократно указывалось, что полученные корреляционные формулы (3)—(6) могут быть использованы для приближенной оценки теплопроводности водонасыщенных образцов осадочных пород при наличии измеренных значений λ_c и $K_{п}$. В качестве примера мы выполнили оценки значений λ_b по разным формулам для осадочных пород из скважин Восток-1 и Восток-3 и сравнили результаты расчетов с измеренными значениями. Результаты расчетов сведены в табл. 2. Во-первых, по уравнению (3) рассчитаны значения λ_b^* по результатам измерений теплопроводности сухих образцов. Затем по формуле (5) рассчитаны значения λ_b^{**} по значениям $K_{п}$ в предположении, что теплопроводность вообще не измерялась. И, наконец, по формуле (6) и значениям λ_c и $K_{п}$ рассчитаны значения λ_b^{***} .

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений λ_b показывает, что разница между ними для отдельных образцов может быть значительной. И это неудивительно, так как уравнение регрессии позволяет оценить только среднее из нескольких λ_b , отвечающих одному определенному значению λ_c или $K_{п}$, или их совокупности. Однако средние расчетные значения λ_b для всех образцов отличаются от экспериментального среднего не более чем на 3—5 %. Понятно, что оценочные результаты для образцов пород, не вошедших в нашу коллекцию, могут быть несколько хуже. Но в любом случае при проведении температурных расчетов целесообразнее использовать оценочные значения λ_b (они будут гораздо ближе к истинным), чем теплопроводность сухих образцов. Это особенно справедливо для осадочных пород с высокой пористостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены измерения теплопроводности 135 сухих образцов осадочных пород из керна девяти скважин, пробуренных в двух разных районах Западно-Сибирской плиты. Впоследствии 92 образца из этой коллекции были насыщены водой и вновь измерена их теплопроводность. Для части образцов в лаборатории седиментологии ИНГГ СО РАН определены коэффициенты пористости и проницаемости. Сопоставление результатов измерений показало, как и следовало ожидать, что теплопроводность осадочных пород определяется в первую очередь пористостью и типом флюида (воздух, вода), насыщающего поры. В наших экспериментах после насыщения водой теплопроводность осадочных пород (средняя пористость ~ 12 %) возрастала в среднем на 30—40 %. Это показывает, насколько важно использовать

при различных геотермических расчетах именно значения λ_b , хотя бы оцененные косвенно посредством применения корреляционных связей.

По нашим данным (см. табл. 1) мы установили наличие корреляционных связей между λ_b и λ_c (3), λ_c и K_{II} (4), λ_b и K_{II} (5), λ_c и K_{III} (7), а также между отношением λ_b/λ_c и K_{II} (6). Следует отметить, что уравнение регрессии (6) хорошо соответствует корреляционным связям, полученным ранее для других районов Западно-Сибирской плиты [Роров et al., 2003; Попов и др., 2008]. Для приближенной оценки λ_b по измеренным значениям теплопроводности сухих пород и их пористости можно рекомендовать использовать формулы (3) и (6). Очевидно, что теплопроводность пород можно примерно оценить по формулам (4), (5), (7) и до проведения теплофизических измерений, используя значения пористости и проницаемости. Приведенный в статье пример (см. табл. 2) показал, что использование некоторых из указанных формул для расчета значений λ_b приводит к удовлетворительному совпадению с результатами измерений.

На наш взгляд, весьма важным является и очевидный вывод о том, что установленные зависимости можно использовать для оперативной оценки пористости и проницаемости пород по предварительно измеренным значениям λ_c . Теплопроводность сухих пород измеряется намного проще и быстрее, чем пористость и проницаемость, особенно при использовании современной экспрессной аппаратуры типа ИТС. Используя опережающие детальные измерения λ_c керна, можно, например, выявить высокопористые интервалы разреза, которые в дальнейшем можно будет более детально изучить традиционными методами.

Очевидно также, что выявленные корреляционные связи, имеющие большое значение для оперативной оценки тепловых и структурных свойств осадочных пород, требуют дальнейшего уточнения. Необходимо продолжить работу по увеличению объема выборок измеренных параметров для разных типов пород и геологических провинций, а также анализу и уточнению рассмотренных в статье корреляционных зависимостей.

Авторы благодарят академика А.Э. Конторовича за постоянное внимание к данной работе, предоставление керна материала и геологической информации.

Работа частично поддерживалась интеграционным проектом ОНЗ 7-1 (2012-2014).

ЛИТЕРАТУРА

Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.

Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1998, 280 с.

Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Злобина О.Н. Теплопроводность пород осадочного чехла арктической части Западной Сибири // Геология и геофизика, 2013 (12), с. 1952—1960.

Калинин А.Н., Соколова Л.С., Дучков А.Д., Черепанов В.Я. Исследования теплового компаратора применительно к измерениям теплопроводности горных пород // Геология и геофизика, 1983 (3), с. 116—122.

Курчиков А.Р., Ставицкий Б.П. Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. М., Недра, 1987, 134 с.

Новиков С.В., Попов Ю.А., Тертычный В.В., Шако В.В., Пименов В.П. Возможности и проблемы современного теплового каротажа // Геология и разведка, 2008, № 3, с. 54—57.

Попов Ю.А., Семенов В.Г., Коростелев В.М., Берзин В.В. Бесконтактное определение теплопроводности горных пород с помощью подвижного источника тепла // Физика Земли, 1983, № 7, с. 86—93.

Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Попов Е.Ю. Теплофизические исследования пород разреза Тюменской сверхглубокой скважины // Тюменская сверхглубокая скважина (интервал 0—7502 м). Результаты бурения и исследования: сборник докл. Научное бурение в России. Вып. 4. Пермь, КамНИИКИГС, 1996, с. 163—175.

Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Горобцов Д.Н., Коробков Д.А., Есипко О.А., Карасева Т.В., Сиротенко Л.В. Тепловые свойства пород и тепловой поток в районе бурения сверхглубокой Ен-Яхинской скважины // Геология и разведка, 2008 (2), с. 59—65.

Тепловое поле недр Сибири / А.Д. Дучков, С.В. Лысак, В.Т. Балобаев и др. Новосибирск, Наука, 1987, 195 с.

Теплофизические свойства горных пород / В.В. Бабаев, В.Ф. Будыка, Т.А. Сергеева и др. М., Недра, 1987, 156 с.

Popov Yu., 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, v. 160, p. 1137—1161.

*Поступила в редакцию
22 августа 2013 г.*