

2. На основе разработанной модели созданы вычислительный алгоритм и компьютерная программа «Heatmassgrunt», позволяющая проводить расчет полей температур, влажности и льдистости в грунтах вблизи инженерных сооружений.

3. Проведено расчетно-теоретическое исследование нестационарных полей температуры и льдистости вблизи заглубленного трубопровода. Установлено существенное влияние миграции влаги на поля льдистости вблизи заглубленного трубопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 464 с.
2. Гребер Г., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене. М.: Иностран. лит-ра, 1958. 586 с.
3. Теория теплообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высш. шк., 1979. 495 с.
4. Цытович И.А. Механика мерзлых грунтов: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1973. 448 с.
5. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: Справочное пособие. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 146 с.
6. Даниэлян Ю.С., Зайцев В.С. Определение коэффициента теплопроводности больших массивов грунтов // Нефтяное хозяйство. 2009. № 5. С. 98-100.
7. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
8. Пульдас Л.А. Нестационарные тепловые режимы в гражданских зданиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2008. 20 с.

Борис Владимирович ГРИГОРЬЕВ —
аспирант Тюменского государственного университета
Raskatov_@mail.ru

Нелли Федоровна ЧИСТЯКОВА —
профессор кафедры механики многофазных систем,
доктор геолого-минералогических наук
encyclopedia@utmn.ru

Александр Борисович ШАБАРОВ —
профессор кафедры механики многофазных систем,
доктор технических наук
Тюменский государственный университет
TU1487@mail.ru

УДК 536.2: 551.25(571.12)

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО БАСЕЙНА

THERMAL CONDUCTIVITY OF ROCKS IN THE WEST-SIBERIAN OIL AND GAS BASIN

АННОТАЦИЯ. Создана экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности горных пород и впервые проведено сравнение расчетного и экспериментального определений коэффициента теплопроводности на примере пород различного литологического состава Тюменской области.

SUMMARY. An experimental system has been designed for the estimation of the rocks thermal conductivity factor. Estimated and experimental determinations of the thermal conductivity factor have been compared for the first time by the example of rocks with a different lithological composition from the Tyumen Region fields.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Теплопроводность, горные породы, экспериментальная установка.

KEY WORDS. Thermal conductivity, rocks, experimental system.

Данные о теплофизических характеристиках горных пород и насыщающих их флюидах в разрезе и на площади нефтегазоносного бассейна необходимы для физико-математического моделирования процессов формирования залежей углеводородов, размещения скважин при их разработке и др. Анализ естественного теплового поля в недрах осадочно-породного бассейна позволяет установить особенности распределения, теплофизических характеристик горных пород, изменяющихся под влиянием перехода осадочно-породного бассейна, не содержащего залежей углеводородного сырья, в нефтегазопродукующий и нефтегазосодержащий бассейн; проводить корреляцию разрезов с выделением различных литологических типов горных пород; выделять продуктивные газо- и нефтесодержащие пласты в разрезе осадочно-породного бассейна, т.е. в конечном счете решать задачи, связанные с поиском, разведкой и разработкой нефтяных и газовых месторождений. Изучение искусственно созданных тепловых полей, например, распространения фронта тепловой волны при термическом воздействии на пласт; изучение тепловой конвекции углеводородных флюидов, смеси жидких и газообразных флюидов в скважине и пласте является источником новой информации и позволит вносить требуемые коррективы в этот процесс.

Осадочный чехол юрско-мелового возраста Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна состоит из терригенных пород: песчаников, алевролитов, глин (аргиллитов). Коэффициенты теплопроводности зависят от химического и минерального состава породы, нефтеводонасыщенности, коэффициента пористости, объемной и минеральной плотности горных пород. Коэффициенты теплопроводности каждого литологического типа породы изменяются в широких пределах [4, 14].

Изучению коэффициентов теплопроводности посвящен ряд исследований.

А.В. Кирюхиным и др. [1] была создана экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности горных пород. В.И. Ляшков [2] в своей установке использует специальный датчик, фиксирующий величину теплового потока q Вт/м², что повышает точность проводимых экспериментов. В эксперименте В.И. Крутова и Е.В. Шишова [3] используются два образца, расположенных по обе стороны нагревателя, и соответственно два холодильника, в которых качестве охлаждающего теплоносителя используется проточная вода. Б.Г. Кокшеневым [4] для расчетного определения коэффициента теплопроводности предложено использовать формулы, основанные на аналогии теплопроводности и электропроводности, потоков тепла и электрического поля.

В ходе анализа проводимых ранее работ по экспериментальному определению коэффициента теплопроводности нами выявлены их основные недос-

татки, что позволило их учесть и устранить при создании собственной установки. В нашей установке величина плотности теплового потока фиксируется как со стороны нагревателя, так и со стороны холодильника; для уменьшения потери тепла через боковую поверхность образца последняя покрывается жидко-керамическим покрытием; для улучшения теплового контакта в системе «нагреватель-термометр-образец» на поверхность контакта наносится тонкий слой теплопроводной кремнийорганической пасты. Для учета возможного неравномерного распределения температуры по поверхностям образца, используются по две термопары с обеих сторон.

В установке используется стационарный метод плоского слоя [11; 12].

Расчетная формула для определения коэффициента теплопроводности по измеренным тепловым потокам и температурам имеет вид:

$$\lambda = \frac{qL}{T_1 - T_2} \text{ [Вт/(мК)]}$$

где q — плотность теплового потока [Вт/м²]; L — толщина пластины [м]; T_1 , T_2 — температура по обеим сторонам пластины [К].

Схема экспериментальной установки, смонтированной авторами в лаборатории теплофизики кафедры механики многофазных систем Тюменского госуниверситета, показана на рис. 1.

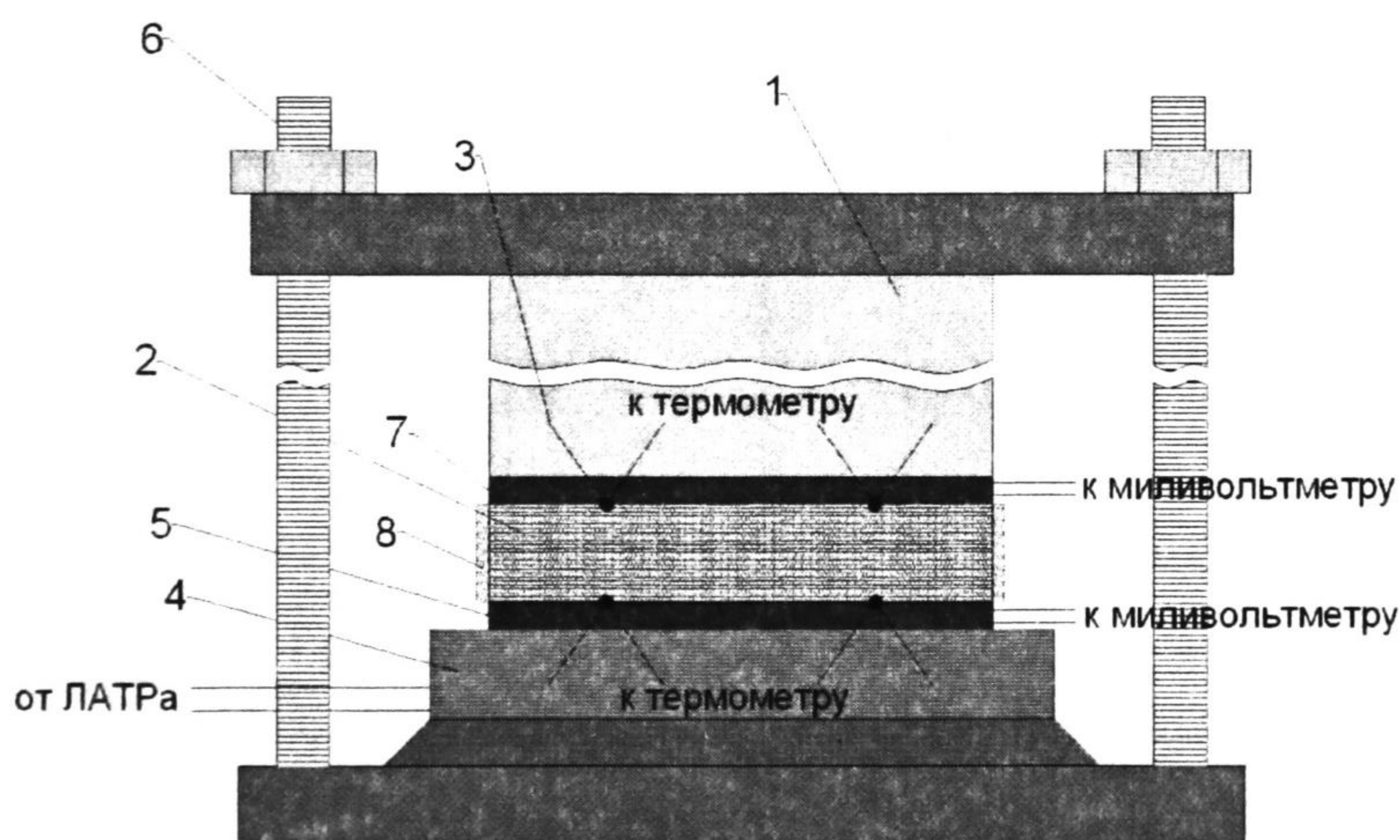


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка включает основное лабораторное оборудование:

— плоский электрический нагреватель (4), предназначенный для нагрева нижней поверхности испытуемого образца, который обеспечивает получение достаточно больших тепловых потоков через образец (до 10^4 Вт/м²);

— термопары (3), расположенные в специальных канавках и плотно прижимаемые к образцу с двух сторон;

— термоэлементы (7, 5), установленные как со стороны нагревателя, так и со стороны холодильника, и генерирующие термоЭДС [мВ], величина которой пропорциональна величине q [Вт/м²], коэффициент преобразования K_0

$\left[\frac{Вт}{м^2 \cdot мВ} \right]$ указан в паспорте термоэлемента, так что $q = K_d E_d$, где E_d — ЭДС,

генерируемая термоэлементом, мВ;

— прижимное устройство (6), служащее для создания необходимого давления на образец с целью устранения контактных сопротивлений на границе тепломер — образец;

— массивный металлический цилиндр (1), служащий для отвода теплового потока и охлаждаемый при естественной конвекции;

— регулируемый источник переменного тока V (ЛАТР), служащий для питания электронагревателя и задания уровня теплового потока через исследуемый образец (2);

— теплоизоляционное покрытие (8);

— цифровой термометр;

— милливольтметр.

Плоский образец диаметром 6,3 см располагается на электронагревателе; по обе стороны образца находятся термоэлементы и между ними и образцом закреплены термопары (рис. 1). Когда на электронагреватель подается напряжение, он создает тепловой поток, идущий через образец. Значения термоЭДС, определяющие величину тепловых потоков, фиксируются милливольтметром, температура измеряется термопарами. Данные замеров на примере образца № 8 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения температуры и ЭДС, замеренные в ходе эксперимента и полученные промежуточные значения теплопроводности

Время от начала, мин	E1 мВ	E2 мВ	Tгор1, °С	Tгор2, °С	Tхол1, °С	Tхол2, °С	λ , Вт/(мК)
0	0	0	21	21	21	21	0,00
0,5	6,5	0	23	22,5	21	21	1,49
1	14,2	1,4	24	24	21	22	2,52
1,5	23,5	3,5	27	27	23	23	2,73
2,5	31,5	7,8	31	31	25	25,5	2,78
3,5	35,2	13,2	35	36	28	28	2,63
5,5	39,4	21,5	42	42	32	32	2,49
7,5	40,6	27,2	47	46	35	35	2,42
10,5	42,6	32,6	51	51	38	39	2,47
13,5	43,4	36,8	54	54	41	40	2,44
17,5	44,4	40,2	57,5	57	43	43	2,45
21,5	45,4	43,5	60	60	45	45	2,44
26,5	46,1	45,6	62	62	46	47	2,44
31,5	46,2	47,1	64	64	49	48	2,48
36,5	46,1	47,8	65	65	49	49	2,42

Расчетная формула для определения коэффициента теплопроводности в данной установке имеет вид:

$$\lambda = \frac{(K_1 E_1 + K_2 E_2) L}{(T'_1 + T'_2) - (T''_1 + T''_2)} \text{ [Вт/(мК)]} \quad (1)$$

где E_1, E_2 — термоЭДС, генерируемая термоэлементами, соответственно со стороны нагревателя и со стороны холодильника, мВ; K_1, K_2 — коэффициенты преобразования $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{мВ}} \right]$; T'_1, T'_2 и T''_1, T''_2 температуры образца соответственно со стороны нагревателя и холодильника [°C].

В течение 40 минут с начала эксперимента фиксируются показания термоэлементов и термопар с интервалом 2-5 минут. Опыт считается завершенным, когда значение коэффициента теплопроводности будет повторяться с разбросом не более чем $\pm 5\%$ процентного отклонения его результатов от результатов предыдущих значений.

Характерное изменение по времени параметра λ для образца № 8, рассчитанное по формуле (1), приведено на рис. 2.

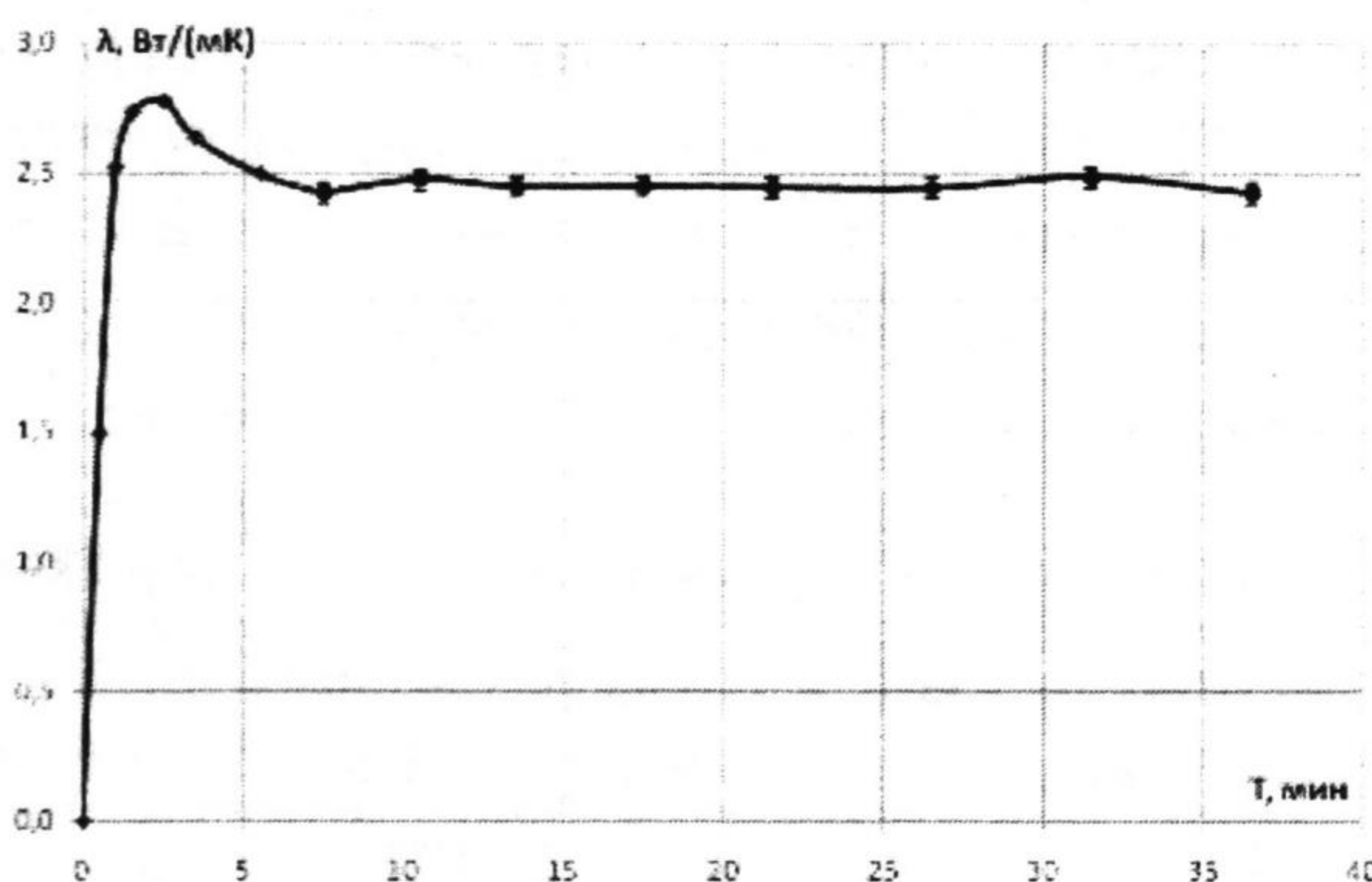


Рис. 2. График зависимости значений теплопроводности от времени проведения эксперимента

Из рис. 2 следует, что стационарный режим наступает спустя 7.5 минут от начала эксперимента. Из всех экспериментальных точек, полученных спустя 7.5 минут, находим среднее значение коэффициента теплопроводности. В данном примере оно равно 2.45 Вт/(мК).

В табл. 2 представлены экспериментальные данные коэффициента теплопроводности исследуемых образцов пород различного литологического состава, типичных для Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, а также абсолютные $\Delta\lambda_{\text{абс}}$ и относительные $\Delta\lambda_{\text{отн}}$ погрешности экспериментов.

Таблица 2

Экспериментальные значения теплопроводности образцов

№ обр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\lambda_{\text{эксп}}, \text{Вт/(мК)}$	1,01	1,30	1,17	2,06	1,90	1,99	2,42	2,45	1,97	2,36	2,71	1,69	1,53	2,54	2,32
$\Delta\lambda_{\text{абс}}, \text{Вт/(мК)}$	0,03	0,02	0,01	0,02	0,04	0,02	0,04	0,04	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03
$\Delta\lambda_{\text{отн}}, \%$	3,38	1,30	1,22	1,03	2,08	1,19	1,57	1,60	0,56	1,00	0,91	1,63	1,00	1,15	1,26

Для расчета теплопроводности λ по формуле (2) Б.Г. Кокшенева [4]: необходимо иметь данные о минеральном составе, пористости, плотности и влажности каждого конкретного образца, а также табличные значения коэффициента теплопроводности всех минералов, входящих в состав каждого исследуемого образца горной породы (из справочников).

$$\xi_{1,2} = \frac{w\xi_1 + (3-w)\xi_2}{\xi_1(3-2w) + 2w\xi_2} \xi_1 = \frac{3 + w\left(\frac{\xi_1}{\xi_2} - 1\right)}{\frac{3\xi_1}{\xi_2} - 2w\left(\frac{\xi_1}{\xi_2} - 1\right)} \xi_1, \text{ [мК/Вт]} \quad (2)$$

где ξ_2 — тепловое сопротивление твердой фазы [мК/Вт]; ξ_1 — тепловое сопротивление заполняющего минерала [мК/Вт]; w — объемное содержание в породе заполняющего минерала (в том числе жидких и (или) газообразных флюидов).

Формула (2) справедлива для двухфазной горной породы, каждая фаза которой мономинеральна. Методика расчета теплового сопротивления с использованием формулы (2) для полиминеральной породы с различным типом заполнителя порового пространства подробно описана в [4].

Минералогический состав горных пород определялся методом рентгеноструктурного анализа [5]; [6]; [7] с использованием рентгеновского дифрактомера PW1800 на K_{α} Си излучении в интервале углов 2° - 40° 2θ . Качественный состав и количественное соотношение минералов в образцах горных пород представлены в табл. 3.

Таблица 3

Соотношение минералов в образцах породы

№ обр	Соотношение минералов в породах различного литологического состава (расчеты проведены по данным рентгеноструктурного анализа)								
	(ГС+СО), %	(К+Хл), %	Кв, %	НаПш, %	КПш, %	Кц, %	Дл, %	Сд, %	Пр, %
1	1,7	9,9	54,0	26,9	7,2	0,0	0,0	0,0	0,0
2	2,3	11,1	57,0	23,4	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0
3	2,6	11,3	58,0	22,3	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0
4	5,9	11,8	43,8	34,0	0,0	0,0	0,0	4,6	6,1
5	25,9	11,0	54,4	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	17,1	14,8	39,4	28,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	13,8	15,0	54,8	16,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0
8	4,5	12,8	63,1	17,3	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0
9	9,4	19,4	51,2	15,5	0,0	0,0	0,0	4,5	0,0
10	4,7	11,4	60,3	20,8	0,0	1,9	0,0	1,0	0,0
11	5,1	10,2	56,3	19,5	0,0	6,9	0,0	1,9	3,8
12	9,1	11,9	14,1	8,7	0,0	4,5	31,9	15,9	0,0
13	12,7	19,9	44,7	21,3	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0
14	8,3	7,5	63,2	19,4	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0
15	7,2	6,5	62,4	22,1	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0

Обозначения. (ГС+СО) — сумма гидрослюды и смешаннослойных минералов; (К+Хл) — сумма каолинита и хлорита; НаПш и КПш натриевый и калиевый полевые шпаты; Кц — кальцит; Дл — доломит; Сд — сидерит; Пр — пирит.

В исследуемых образцах горных пород были определены также плотность [4]; [8], объемная влажность [8]; [9], пористость [4]; [9] (методом Преображенского). Результаты измерений помещены в табл. 4.

Таблица 4

Значения пористости, плотности и объемной влажности образцов

№ обр	Пласт	Интервал кровли, м	Кп, %	Плотность объемная, г/см ³	Плотность минеральн, г/см ³	Объемная влажность, %
1	ВК1	1598,0	25,9	1,97	2,66	6,2
2	ВК1	1598,0	26,2	1,96	2,65	6,3
3	ВК1	1598,0	26,1	1,96	2,65	6,3
4	ЮК2-3	2558,8	12,3	2,35	2,68	3,4
5	ЮК2-3	2558,8	5,3	2,53	2,57	0,2
6	ЮК2-3	2570,0	4,4	2,53	2,65	0,9
7	ЮК4	2581,0	5,3	2,54	2,68	1,3
8	ЮК4	2581,0	8,6	2,48	2,67	2,1
9	ЮК4	2596,0	3,4	2,59	2,68	0,2
10	ЮК4	2596,0	10,5	2,40	2,68	2,5
11	ЮК4	2596,0	5,5	2,54	2,69	1,1
12	ЮК4	2596,0	12,8	2,54	2,94	2,6
13	ЮК4	2596,0	4,3	2,54	2,65	0,2
14	ЮК4	2581,0	11,4	2,38	2,68	3,9
15	ЮК4	2581,0	11,6	2,36	2,67	3,7

Таким образом, используя формулу (2) и данные табл. 3 и 4, были получены значения коэффициента теплопроводности исследуемых образцов горных пород различного литологического состава.

Таблица 5

Значения теплопроводности горных пород, полученные по формуле Б. Г. Кокшенева

№ обр	Литологическое описание	Кп, %	λ породы расч, Вт/(мК)
1	Песчаник мелкозернистый алевритовый до алевролита крупнозернистого песчаного с вкраплениями детрита	25,9	1,07
2	Песчаник мелкозернистый алевритистый	26,2	1,06
3	Песчаник мелкозернистый алевритистый	26,1	1,06
4	Песчаник мелкозернистый однородный	12,3	1,79
5	Аргиллит алевритистый	5,3	1,66
6	Аргиллит	4,4	2,06

Окончание табл. 5

7	Алевролит разнозернистый	5,3	2,31
8	Песчаник мелкозернистый алевритистый	8,6	2,24
9	Аргиллит	3,4	1,83
10	Песчаник мелкозернистый однородный нефтенасыщенный	10,5	2,22
11	Песчаник карбонатный мелкозернистый	5,5	2,53
12	Аргиллит карбонатизированный	12,8	1,46
13	Алевролит мелко-крупнозернистый глинистый	4,3	1,54
14	Песчаник мелкозернистый	11,4	2,25
15	Песчаник мелкозернистый	11,6	2,20

Анализ полученных данных

С целью проведения анализа коэффициента теплопроводности горных пород, полученного двумя способами, применим графический метод, позволяющий наглядно представить связь между этими способами.

Таблица 6

Экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности

№ обр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\lambda_{\text{расч}}$, Вт/(мК)	1,07	1,06	1,06	1,79	1,66	2,06	2,31	2,24	1,83	2,22	2,53	1,46	1,54	2,25	2,2
$\lambda_{\text{эксп}}$, Вт/(мК)	1,01	1,3	1,17	2,06	1,9	1,99	2,42	2,45	1,97	2,36	2,71	1,69	1,53	2,54	2,32

Графическое изображение зависимости расчетных данных от экспериментальных (рис. 3) представляет собой зависимость, близкую к линейной, что подтверждает возможность использования расчетного и экспериментального методов для получения значений λ горных пород в равной степени.

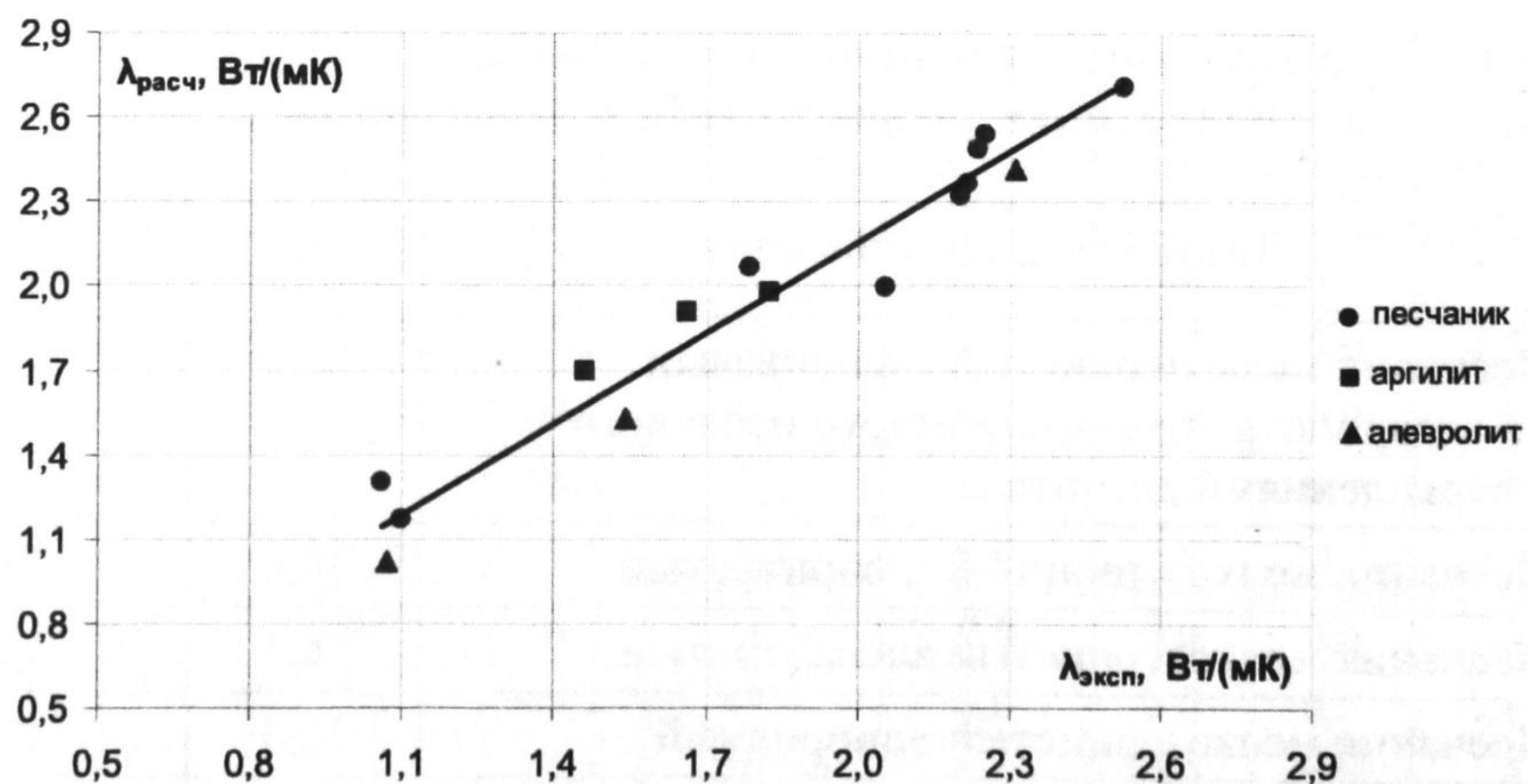


Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных коэффициента теплопроводности

Величина различия данных, полученных расчетным и экспериментальными методами, зависит от литологического состава горной породы и составляет 8-10% для песчаников и 4-6% — для алевролитов и аргиллитов. Сопоставление данных расчетного и экспериментального определения λ в образцах горных пород различного литологического состава показывает, что расчетный метод можно использовать для расчета теплопроводности образцов горных пород любого литологического состава с учетом эмпирически полученного поправочного коэффициента, равного 1,08.

Выводы

1. Создана и прошла апробацию экспериментальная установка для определения коэффициента теплопроводности, позволяющая повысить точность проводимых экспериментов.

2. Проведено расчетно-теоретическое и экспериментальное исследование коэффициентов теплопроводности горных пород различного литологического состава.

3. Для исследованных образцов установлено, что значения коэффициента теплопроводности алевролитов и аргиллитов, полученные по формуле Кокшенева, на 4-6% ниже экспериментальных данных, а для песчаников данное различие составляет 8-10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюхин А.В., Поляков А.Ю., Богатко Н.П. Разработка методики и определение теплофизических свойств гидротермально измененных пород в очагах разгрузки парогидротерм. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2007.

2. Ляшков В.И. Исследование теплопроводности твердых тел стационарным методом плоского слоя. Тамбов: ТГТУ, 2005.

3. Крутов В.И., Шишов Е.В. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче. М.: Высшая школа, 1988.

4. Кобранова В.Н. Физические свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1962.

5. Франк-Каменецкий В.А. Рентгенография основных типов породообразующих минералов. Л.: Недра, 1983.

6. Шлыков В.Г. Рентгеновское исследование грунтов. М.: Изд-во Московского университета (геология), 1991.

7. Герасимов В. Н., Доливо-Добровольская Е. М., Каменцев И. Е. Руководство по рентгеновскому исследованию минералов. М.: Недра, 1975.

8. Страхов Н. М., Бушинский Г. И., Пустовалов Л. В. Методы изучения осадочных пород. М.: Госгеолтехиздат, 1957.

9. Добрынин В. М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика. М.: Нефть и газ, 2004.

10. Могутов В.А., Хлевчук В.Р., Фетисов В.В., Мелентьев Н.Н. ГОСТ 7076-87. Метод определения теплопроводности. М., 1987.

11. Кислицын А.А., Бахмат Г.В., Шабаров А.Б. УМК «Итоговая государственная аттестация выпускников по специальности 010701.65 — Теплофизика». Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2008.

12. Кислицын А.А. Основы теплофизики. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2002.

13. Clark P., Справочник физических констант горных пород (перевод с английского). М.: Мир, 1969.

14. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. М.: Недра, 1976.

15. Михеев В. И. Рентгенометрический определитель минералов. М.: Госгеотехиздат, 1957.