УДК 692.115

Д.П. Медведев, А.В. Захаров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

АНАЛИЗ СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА С ЗАРУБЕЖНЫМИ РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

Представлены три методики расчета теплопроводности грунтов, предложенные зарубежными авторами, а также сравнение результатов расчета теплопроводности с измеренными в ходе натурного эксперимента значениями.

Ключевые слова: теплопроводность грунта, тепловой грунтовый насос, энергоэффективные фундаменты.

D.P. Medvedev, A.V. Zakharov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

CONVERGENCE ANALYSIS OF THE RESULTS OF FIELD MEASUREMENTS OF THERMAL CONDUCTIVITY OF SANDY SOIL WITH FOREIGN CALCULATION METHODS

This article presents three methods of calculating the thermal conductivity of the soil proposed by foreign authors, as well as a comparison with the results of calculating the thermal conductivity measured in the field experiment values.

Keywords: thermal conductivity of the soil, soil pump heat, energy-efficient foundations.

В настоящее время потребность в тепловой энергии покрывается в большей степени за счет угля, нефти и газа. Наличие этих ископаемых энергоносителей ограничено, и они относятся к невозобновляемым. Поэтому их стоимость постоянно возрастает.

В качестве альтернативного источника тепловой энергии все чаще применяется грунтовый тепловой насос [1–4]. Однако для использования основания в целях теплового коллектора для охлаждения зда-

ния летом и обогрева зимой необходимо знать теплотфизические характеристики, в частности теплопроводности и теплоемкости.

В зарубежной литературе приводится ряд расчетных методов определения теплопроводности грунтового массива. Во всех этих методах имеется ряд допущений, позволяющих упростить математическую модель сложного процесса теплопередачи в грунтовом основании.

В данной статье представлен анализ существующих расчетных методов определения теплопроводности и сравнение с результатами проведенных экспериментальных исследований для песчаного грунта.

В зарубежной литературе приводится ряд методов, которые применяются для получения значения теплопроводности. В данной статье рассмотрено три метода: метод авторства Johansen (метод № 1) [6], метод авторства Côté and Konrad (метод № 2) [6], [7] и метод авторства Sen Lu и соавторов (метод № 3) [8].

Метод № 1 состоит из четырех шагов:

- 1) определения теплопроводности в сухом состоянии;
- 2) определение теплопроводности в насыщенном состоянии;
- 3) определение числа Керстена;
- 4) расчет теплопроводности.

Для определения теплопроводности грунта в сухом состоянии используется уравнение

$$\lambda_{\text{dry}} = \frac{0,135\rho_d + 0,0647}{\rho_s - 0,947\rho_d}, \quad (1)$$

где λ_{dry} – теплопроводность в сухом состоянии, Вт/(м·К); ρ_d – плотность сухого грунта, г/см³; ρ_s – плотность частиц грунта, г/см³.

В данном методе плотность частиц грунта принимается 2,7 г/см³, однако в настоящей работе было использовано значение, полученное экспериментальным путем и равное 2,58 г/см³.

Для определения теплопроводности в насыщенном состоянии λ_{sat} для грунтов природного сложения в зависимости от пористости e , содержания кварца q и объемной влажности ω применяется формула

$$\lambda_{\text{sat}} = \lambda_s^{1-e} \lambda_i^{e-\omega} \lambda_w^{\omega}, \quad (2)$$

где теплопроводность льда $\lambda_i = 2,2$ Вт/(м·К); теплопроводность воды $\lambda_w = 0,57$ Вт/(м·К); теплопроводность частиц грунта λ_s определяется по формуле

$$\lambda_s = \lambda_q^q \lambda_0^{1-q}. \quad (3)$$

В приведенном выше уравнении теплопроводность кварца $\lambda_q = 7,7$ Вт/(м·К), а теплопроводность других минералов принимается как $\lambda_0 = 2,0$ Вт/(м·К) при $q > 0,2$ и $\lambda_0 = 3,0$ Вт/(м·К) при $q \leq 0,2$. В условиях нашего эксперимента неизвестно содержание кварца в песке, поэтому приближенно понимаем $q = 0,7$.

Число Кирстена является функцией от степени влажности S_r и от фазы воды в грунте. Для незамерзшего грунта в данном методе определяется по формуле

$$K_e = \log S_r + 1,0; S_r > 0,1. \quad (4)$$

Метод № 2 авторства Коте и Конрада. Данный метод является модификацией метода Йохансена. Для устранения логарифмической функции Коте и Конрад связали число Кирстена K_e со степенью влажности S_r , используя зависимый от структуры грунта параметр k :

$$K_e \frac{k S_r}{1 + (k-1) S_r}. \quad (5)$$

Значение k , используемое в данной модели, для песков принимается 1,90. Кроме того, авторы предложили новое эмпирическое уравнение зависимости теплопроводности в сухом состоянии от пористости грунта e :

$$\lambda_{dry} = \chi 10^{-\eta e}, \quad (6)$$

где χ (Вт/(м·К)) и η – параметры для учета влияния размеров частиц.

Значения χ и η , приведенные Коте и Конрадом для песков, составили $0,75$ Вт⁻¹К⁻¹ и 1.20. В данном случае используется то же самое уравнение для получения λ_{sat} , предложенное в методе № 1 (2), однако для подсчета λ_s они применили другой метод: вместо теплопроводности кварца и других минералов (что использовалось в модели Йохансена) λ_s был рассчитан на основе теплопроводности и объемной доли

породообразующих материалов. В данной же работе теплопроводность частиц грунта вычислена по методу № 1 (3).

Метод № 3 авторства Sen Lu и соавторов. Данный метод предложен авторами статьи [7] как усовершенствование метода № 2. Была предложена новая зависимость числа Кирстена K_e от степени водонасыщения S_r для всего диапазона влажности с учетом гранулометрического состава грунта:

$$K_e = \exp\left\{\alpha\left[1 - S_r^{\alpha-1,33}\right]\right\}, \quad (7)$$

где α – коэффициент, зависящей от типа грунта; 1,33 – параметр формы.

Также приводится линейная зависимость теплопроводности сухого грунта λ_{dry} от его пористости:

$$\lambda_{\text{dry}} = -an + b, \quad (8)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты.

Для расчета λ_{sat} использовалась та же формула, что и в модели Йохансена (формула (2)). Также в этом методе используется предположение, что содержание кварца равно содержанию песка, т.е. в условиях нашего эксперимента $q = 1$.

Значения теплопроводности вычислены для песчаного грунта с плотностью частиц грунта $\rho_s = 2,58 \text{ г/см}^3$. В табл. 1 представлены результаты расчетов по трем методам и результаты определения теплопроводности грунтов, полученные экспериментальным методом подробно описанном в [5].

Таблица 1

Результаты определения теплопроводности песчаного грунта
расчетными и экспериментальными методами

Номер измерения	Плотность ρ , г/см ³	Влажность, ω , д.е.	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)			
			Метод № 1	Метод № 2	Метод № 3	Эксперимент
1	1,76	3,66	2,63	2,15	2,43	1,82
2	1,82	7,82	3,12	2,08	3,54	2,76
3	1,85	10,30	3,23	2,02	3,79	2,92
4	1,89	13,10	3,26	1,95	3,90	3,06
5	1,92	16,10	3,24	1,87	3,88	2,85

6	1,75	4,03	2,61	2,09	2,45	1,85
7	1,82	9,05	3,08	2,00	3,54	2,56
8	1,85	11,80	3,16	1,94	3,72	2,76
9	1,89	15,60	3,16	1,84	3,76	2,86
10	1,91	17,04	3,13	1,80	3,73	2,76

Окончание табл. 1

Номер измерения	Плотность ρ , г/см ³	Влажность, ω , д.е.	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)			
			Метод № 1	Метод № 2	Метод № 3	Эксперимент
11	1,70	3,40	2,32	1,99	1,94	1,42
12	1,76	7,04	2,78	1,94	2,99	2,35
13	1,80	10,50	2,95	1,88	3,38	2,72
14	1,82	12,00	2,98	1,84	3,46	2,91
15	1,86	15,90	2,97	1,74	3,50	2,86
16	1,88	18,30	2,93	1,68	3,44	2,81

После вычисления теплопроводности проведено сравнение расчетных методов с результатами измерений. Процент ошибки относительно значений теплопроводности, полученных экспериментальным методом, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты определения процента ошибки расчетных методов относительно натурных измерений

Номер измерения	Процент ошибки относительно		
	метода № 1	метода № 2	метода № 3
1	44,67	18,25	33,40
2	12,76	−24,81	28,18
3	10,32	−30,83	29,68
4	6,54	−36,34	27,15
5	13,52	−34,60	36,03
6	41,34	13,29	32,93
7	20,50	−21,77	38,41
8	14,49	−29,76	34,89
9	10,41	−35,71	31,47
10	13,17	−35,06	34,80

11	63,12	40,31	36,92
12	18,11	–17,44	27,30
13	8,37	–31,02	24,36
14	2,26	–36,72	18,76
15	3,94	–39,01	22,26
16	4,07	–40,33	22,49

Из приведенных выше значений можно заключить, что наиболее близкие к экспериментальным данным результаты получены по методу № 1 (среднее отклонение 10 % в большую сторону), в то время как по методу № 2 получены заниженные результаты (среднее отклонение 30 %), по методу № 3 – результаты, завышенные на 25–30 %.

Однако необходимо учесть, что методы № 1 и № 2 зависимы от содержания влаги: при низкой влажности погрешность значительно выше. Для метода № 1 ошибка в среднем 45 % в большую сторону, при методе № 2 – на 20–25 %, также в большую сторону. При практическом применении наиболее рациональным является применение метода № 1 как наиболее точного и метода № 3 как наиболее простого с учетом понижающего коэффициента порядка 1,3–1,4.

Кроме того, методы № 1 и № 2 дают завышенные значения на всем промежутке влажности. При проектировании энергоэффективных фундаментов более опасно завысить при расчетах теплопроводность грунтов, так как от этого зависит режим работы теплового насоса. Если ожидать более высокую теплопроводность грунтов основания, то тепловой насос будет рассчитан на более интенсивный отбор тепла. В таком случае при меньшей теплопроводности грунта возможно промораживание основания, что недопустимо при нормальной эксплуатации. Введение коэффициента 1,4 для № 1 и № 2 метода позволит снизить расчетное значение теплопроводности грунтов и тем самым обеспечить безопасности эксплуатации конструкций фундамента и грунтового основания.

Библиографический список

1. Васильев Г.П. Теплоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. – М.: Граница, 2006. – 432 с.
2. Бобров И.А., Захаров А.В. Применение тепловой энергии грунтового основания для отопления и кондиционирования зданий // Вест-

ник Перм. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 10–14.

3. Пономарев А.Б., Захаров А.В. Использование геотермальной энергии для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Волгоград. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. – 2010. – № 17 (36). – С. 119–122.

4. Захаров А.В., Пономарев А.Б., Машенко А.В. Энергоэффективные конструкции в подземном строительстве: учеб. пособие для вузов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 127 с.

5. Медведев Д.П., Захаров А.В. Построение уравнения регрессии зависимости теплопроводности от плотности и влажности // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. – 2014. – Вып. 35 (54). – С. 79–84.

6. Usowicz B., Usowicz L. Thermal conductivity of soils – comparison of experimental results and estimation methods // Eurosoil 2004 Congress. – Freiburg, 2004. – 10 p.

7. The Effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes and Temperatures / C.D. Peters-Lidard, E. Blackburn, X. Liang, E.F. Wood // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1998. – Vol. 55, iss. 7. – P. 1209–1224.

8. An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature / Sen Lu, Tusheng Ren, Yuanshi Gong, Robert Horton // Soil Science Society of America. – 2007. – Vol. 71. – P. 8–14.

References

1. Vasiljev G.P. Teplokhadosnabzhenie zdaniy i sooruzhenij s ispol'zovaniem nizkopotentsial'noj teplovoj energii poverhnostnykh sloev Zemli [Warm and cold supply of buildings and structures with low-grade thermal energy of the surface layers of the earth]. Moscow: Granica, 2006, 432 p.

2. Bobrov I.A., Zakharov A.V. Primenenie teplovoj energii gruntovogo osnovaniya dlya otopeniya i konditsionirovaniya zdaniy [Application of thermal energy subgrade for heating and cooling buildings]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2011, no. 1. pp. 10–14.

3. Ponomarev A.B., Zakharov A.V. Ispolzovanie geotermalnoj energii dlya otopeniya i konditsionirovaniya zdaniy [Use of geothermal energy of soils for heating and air-conditioning of buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2010, no.17 (36), pp. 119-122.

4. Zakharov A.V., Ponomarev A.B., Mashchenko A.V. Energoeffektivnye konstruksii v podzemnom stroitel'stve [Power efficient structures in civil engineering]. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2012, 127 p.

5. Medvedev D.P., Zakharov A.V. Postroenie uravneniya regressii zavisimosti teploprovodnosti ot plotnosti i vlazhnosti [Development of the regression equation of thermal conductivity dependence on density and moisture]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 35(54), pp. 79-84.

6. Usowicz B., Usowicz L. Thermal conductivity of soils-comparison of experimental results and estimation methods. *Eurosoil 2004 Congress*. Freiburg, 2004, 10 p.

7. Peters-Lidard C.D., Blackburn E., Liang X., Wood E.F. The Effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes and Temperatures. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, vol. 55, iss. 7, pp. 1209-1224.

8. Sen Lu, Tusheng Ren and Yuanshi Gong, Robert Horton. An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature. *Soil Science Society of America*, 2007, vol. 71, pp. 8-14.

Об авторах

Медведев Данил Павлович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: danil-medvedev@mail.ru).

Захаров Александр Викторович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: spstf@psstu.ru).

About the authors

Medvedev Danil Pavlovich (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Building construction and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: danil-medvedev@mail.ru).

Zakharov Alexandr Viktorovich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building construction and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ru).

Получено 07.04.2014