

УДК 692.115

Д.П. Медведев, А.В. Захаров

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрена проблематика планирования эксперимента для проведения лабораторных исследований в целях получения зависимости теплопроводности грунта от его физических свойств – влажности и плотности. Дана оценка применимости лабораторного оборудования, а также выработана технологическая последовательность проведения эксперимента.

Ключевые слова: теплофизика грунтовых оснований, уравнение регрессии, планирование эксперимента.

В современном мире все большее распространение находят альтернативные возобновляемые источники тепловой энергии. Одно из перспективных направлений – применение тепловых грунтовых насосов, предназначенных для получения геотермальной энергии для обогрева здания в зимнее время и для сброса тепловой энергии в процессе кондиционирования здания в летнее время [1–4]. Для обоснованного использования грунтового основания в данных целях необходимо знать теплотехнические характеристики, в частности, теплопроводность и теплоемкость.

Для оценки возможности получения геотермальной энергии достаточно рассчитанных значений теплотехнических характеристик. В зарубежной практике существует целый ряд методов расчета теплотехнических характеристик исходя из физических характеристик грунтового основания [5–7]. В отечественной же литерату-

ре и нормативных документах таковых не приводится, или же они применимы для узкого спектра мерзлых грунтов. Таким образом, для оценки возможности использования грунтового основания в качестве теплового коллектора необходимы специфические исследования, что замедляет внедрение данной технологии.

Поскольку наибольшее влияние на эффективность использования грунтового основания в качестве теплового коллектора оказывает теплопроводность, целью проводимых исследований стало получение зависимости теплопроводности грунта от его физических свойств – влажности и плотности. Для достижения данной цели проведена серия экспериментов. В качестве входных варьируемых параметров приняты влажность и плотность грунта, выходного параметра – теплопроводность.

Отечественные нормы в части теплотехники не распространяются на грунты, поэтому для определения теплопроводности грунтов в лабораторных условиях необходимо было оценить применимость приборов, изначально предназначенных для теплоизоляционных материалов. Оценка произведена для приборов ИТС-1 и МИТ-1. Были выполнены тестовые эксперименты на образцах глинистого грунта.

Принцип действия прибора ИТС-1 основан на создании проходящего через исследуемый плоский образец стационарного теплового потока. По величине этого теплового потока, температуре противоположных граней образца и его толщине вычисляется теплопроводность образца λ .

Принцип действия прибора МИТ-1 основан на измерении изменения температуры измерительного зонда за определенное время при его нагреве постоянной мощностью. Для внедрения зонда в образце сверлят отверстие диаметром 6 мм. Зонд должен плотно, без люфтов входить в отверстие, стенки отверстия должны быть ровными, без рваных краев. Также не допускаются воздушные прослойки между зондом и исследуемым материалом. При сверлении нельзя снимать материал, поскольку это меняет плотность материала.

Для измерения в приборе ИТС-1 из массива глинистого грунта кольцом высотой 20 мм и диаметром 7,15 см вырезалась серия дисков. С помощью тонкой проволоки поверхность дисков

аккуратно выравнивалась, грани кольца использовались как направляющие. Далее из этих дисков вырезались квадраты, впоследствии образующие образец 150×150 мм. Для выравнивания поверхностей производилась их затирка с водой. После этого образец без короба закрывался фольгой и производились измерения теплопроводности. При использовании прибора МИТ-1 образец необходимо обернуть в фольгу и поместить в бокс, обшитый теплоизоляционным материалом.

Результаты тестовых определений теплопроводностей грунта приведены в таблице.

Результаты тестовых лабораторных экспериментов

Прибор	Номер замера	λ , Вт/(м·К)
ИТС-1	1	1,604
	2	1,604
	3	1,566
МИТ-1	1	1,699
	2	1,581
	3	1,636

На основании лабораторных измерений установлено, что при определении теплопроводности при помощи обоих приборов получены близкие по значению результаты. Поскольку при использовании прибора МИТ-1 подготовка образца менее трудоемка, измерение менее длительно, а результаты согласуются с результатами ИТС-1 (см. таблицу), принято решение использовать для проведения лабораторного эксперимента прибор МИТ-1.

При планировании эксперимента необходимо выделить независимые входные параметры и выходной параметр [8]. В качестве выходного параметра используется теплопроводность грунта, в качестве входных – влажность и плотность. Для получения зависимости планируется использовать квадратичное уравнение регрессии вида

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (1)$$

где x_0 – свободный член, принимается равным единице; x_1 – плотность грунта; x_2 – влажность грунта; $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

Поскольку не представляется возможным подготовить образец заданной влажности и плотности по предварительно заданным параметрам, планируется применять методику нормального уплотнения по ГОСТ 22733–2002 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности» и СН 449–72 «Указания по проектированию земляного полотна железных и автомобильных дорог». В ходе работы будет использоваться песок мелкий с начальной влажностью $\omega_{\text{н}} = 0,0$ с увеличением влажности с шагом около 4 %.

Для уплотнения грунта планируется применять пневматический прибор стандартного уплотнения, который позволяет в автоматическом режиме производить уплотнение заданным количеством ударов.

Поскольку плотность является зависимым параметром от влажности, принято решение построить уравнение регрессии в виде зависимости плотности от влажности и количества ударов уплотнения, что позволяет уйти от зависимого параметра:

$$x_1 = c_0 r_0 + c_3 r_1 + c_2 x_2 + c_{11} r_1^2 + c_{22} x_2^2 + c_{32} r_1 x_2, \quad (2)$$

где r_0 – свободный член, принимается равным единице; r_1 – количество ударов уплотнения; x_2 – влажность грунта; $r_0, r_1, r_2, r_{11}, r_{22}, r_{12}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

Для получения уравнения регрессии для плотности количество ударов уплотнение будет варьироваться на трех уровнях: 5, 15 и 25 ударов уплотнения. Максимальное количество ударов (25) принято по методике СН 449–72 как количество ударов при работе с песчаными грунтами.

Как было сказано выше, начальная влажность соответствует воздушно-сухому состоянию грунта. Увеличение влажности планируется с шагом 4 % путем добавления фиксированного количества воды, вычисленного по формуле

$$Q = P(\omega_{\text{тр}} - \omega_{\text{н}}) \cdot 0,01, \quad (3)$$

где P – объем увлажняемой пробы грунта, г; $\omega_{\text{тр}}$ – требуемая влажность грунта, %; $\omega_{\text{н}}$ – начальная влажность грунта, %.

Последовательное увлажнение грунта будет производиться до тех пор, когда с повышением влажности пробы при последую-

щих двух испытаниях происходит последовательное уменьшение значения плотности уплотняемого образца грунта, а также когда при ударах происходит отжатие воды или выделение разжиженного грунта через соединения формы.

Таким образом, выполнено планирование эксперимента в целях построения уравнения зависимости теплопроводности от влажности и плотности грунта, выполнена оценка возможности использования оборудования для теплоизоляционных материалов в работе с образцами грунта, выбрана технологическая последовательность выполнения эксперимента.

В дальнейшем на основании разработанной методики будет проведен натурный эксперимент, результаты которого позволят получить искомую зависимость. Результаты планируется сопоставить с расчетными методиками зарубежных авторов.

Библиографический список

1. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. – М.: Граница, 2006. – 432 с.
2. Бобров И.А., Калошина С.В., Захаров А.В. Применение тепловой энергии грунтового основания для отопления и кондиционирования зданий // Вестник 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 Волгогр. гос. арх.-стр. ун-та. 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. Usowicz B., Usowicz L. Thermal conductivity of soils—comparison of experimental results and estimation methods // Eurosoil 2004 Congress. – Freiburg, 2004. – 10 p.
6. 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, Issue 7. – P. 1209–1224.
7. 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.
8. Филипов Т.В. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона / Отдел науч.-техн. информ. НИИЖБ. – М., 1982. – 53 с.

References

1. Vasilev G.P. Teplokhladosnabzhenie zdaniy i sooruzheniy s ispolzovaniem nizkopotencialnoi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev Zemli [Heating and cooling of buildings and structures using low-grade heat energy of the surface layers of the Earth]. Moscow: Border, 2006. 432 p.
2. Bobrov I.A., Kaloshina S.V., Zakharov A.V. Primenenie teplovoi energii gruntovogo osnovaniya dlya otopleniya i konditsionirovaniya zdaniy [The use of thermal energy subgrade for heating and cooling buildings]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo polytekhnicheskogo universiteta. Stroitelstvo i arkhitektura*, 2011, no. 1, pp. 1–14.
3. Ponomarev A.B., Zakharov A.V. Ispolzovanie geotermalnoi energii dlya otopleniya i konditsionirovaniya zdaniy [The use of geothermal energy for heating and cooling buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitelstvo i arkhitektura*, 2010, no. 17 (36), pp. 119–122.
4. Zakharov A.V., Ponomarev A.B., Maschenko A.V. Energoeffektivnye konstruksii v podzemnom stroitel'stve. Uchebnoe posobie dlya vuzov [Energy efficient design in civil engineering: a manual for high schools]. Perm: Permskii natsionalnyi issledovatel'skiy polytekhnicheskii universitet, 2012. 127 p.
5. Usowicz B., Usowicz L. Thermal conductivity of soils—comparison of experimental results and estimation methods. *Eurosoil 2004 Congress*. Freiburg, 2004. 10 p.
6. 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, pp. 1209–1224.
7. Sen Lu, Tusheng Ren*, 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.
8. Filipov T.V. Rekomendatsii po primeneniyu metodov matematicheskogo planirovaniya eksperimenta v tekhnologii betona [Recommendations on the use of mathematical experiment planning in concrete technology]. Moscow: Otdel nauchno-tekhnicheskoi informatsii NIIZhB, 1982. 53 p.

Получено 5.11.13

D. Medvedev, A. Zakharov

**DESIGN OF EXPERIMENTS TO DETERMINE
THE THERMAL CONDUCTIVITY OF SANDY SOILS
EXPERIMENTAL METHODS**

This article deals with the problems of experimental design for laboratory studies to obtain the dependence of the thermal conductivity of soil from its physical properties – moisture and density, assessment of the applicability of laboratory equipment, as well as developed technological sequence of experimentation.

Keywords: thermal physics of soil bases, the regression equation, the planning of the experiment.

Медведев Данил Павлович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: danil-medvedev@mail.ru).

Захаров Александр Викторович (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: miks@pstu.ru).

Medvedev Danil (Perm, Russia) – Undergraduate student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: danil-medvedev@mail.ru).

Zakharov Alexandr (Perm, Russia) – Associate Professor, Ph.D. in Technical Sciences, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: miks@pstu.ru).