



DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.07

УДК 624.139

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

К.С. Ядовина, С.С. Лашова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 29 декабря 2015
Принята: 15 января 2016
Опубликована: 31 марта 2016

Ключевые слова:

планирование эксперимента,
лабораторные испытания,
теплофизические характеристики,
глинистый грунт,
теплопроводность, теплоемкость,
калориметрия, температурный
режим, искусственное
замораживание грунтов

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются проблемы проведения экспериментов по изучению теплофизических характеристик грунтов, в частности теплопроводности и теплоемкости. Данные теплофизические параметры учитываются при проектировании специальных способов производства работ, применяемых в подземном строительстве, а именно – искусственном и естественном замораживании грунтов. Указанный способ является наиболее надежным и универсальным, особенно в сложных инженерно-геологических условиях, и используется для закрепления грунтовых массивов. Определение теплофизических свойств грунтов необходимо для выполнения теплотехнических расчетов с применением компьютерного моделирования, которое помогает убедиться в эффективности и надежности принятых решений. Объектом исследования являются глинистые грунты, так как изучение их свойств, как физических, так и теплофизических, при промерзании и оттаивании вызывает наибольший интерес. К тому же на территории Пермского края наибольшее распространение получили именно глинистые грунты. Таким образом, представлены последовательность планирования экспериментального исследования и порядок анализа полученных данных. Выбрана предварительная модель объекта исследования в виде уравнения регрессии, составлена матрица планирования эксперимента. В ходе испытаний планируется получить зависимость теплофизических характеристик глинистого грунта от изменения его показателя текучести при значениях 0,3; 0,6; 0,9, а также зависимость между теплофизическими параметрами грунта различной консистенции и температурой исследуемого образца, которую планируется варьировать в интервале от -10 до $+10$ °С. Кроме того, рассмотрены порядок определения теплопроводности грунта нестационарным способом и методика нахождения теплоемкости исследуемого грунта методом калориметрии. Приведены формулы для обработки полученных опытных данных при исследовании теплоемкости грунта.

© ПНИПУ

© Ядовина Ксения Сергеевна – студентка, e-mail: ksezamova@mail.ru.
Лашова Светлана Сергеевна – студентка, e-mail: Svetlanca93@gmail.com.

Kseniia S. Iadovina – Student, e-mail: ksezamova@mail.ru).
Svetlana S. Lashova – Student, e-mail: Svetlanca93@gmail.com).

PLANNING OF EXPERIMENTAL RESEARCH BY DEFINITION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CLAY SOILS

K.S. Iadovina, S.S. Lashova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 29 December 2015
Accepted: 15 January 2015
Published: 31 March 2016

Keywords:

experiment planning, laboratory researches, thermophysical characteristics, clay soils, heat conductivity, thermal capacity, calorimetry, temperature condition, artificial freezing of soil

ABSTRACT

In this article problems of carrying out experiments on studying of thermophysical characteristics of soils, in particular heat conductivity and thermal capacities are considered. The studied thermophysical parameters are considered at design of the special ways of works used in underground construction, namely in artificial and natural ground freezing. This way is the most reliable and universal, especially in difficult engineering conditions and is used applicable for stabilization of soils mass. Determination of thermal properties of soils is necessary to perform thermal calculations using computer simulations, which helps to ensure the effectiveness and reliability of the made decisions. Object of research are clay soils because studying of their properties both physical, and thermophysical during freezing and thawing attracts the greatest interest. In addition, in the Perm region the most widely spread are clay soils. Thus, the sequence of planning of experimental research and an order of the analysis of the captured data is presented. The preliminary model of object of research in the form of the regression equation is chosen, the experiment planning matrix is made. During tests it is planned to receive dependence of thermophysical characteristics of clay soils on change of its indicator of fluidity at values: 0,3; 0,6; 0,9. And also dependence between thermophysical parameters of soils of various consistence and temperature of the studied sample which is planned to vary from -10 to $+10$ °C. Besides, an order of determination of heat conductivity of soils in the non-stationary way and a technique of finding of a thermal capacity of the studied soil by a calorimetry method are considered. Formulas for processing of the obtained skilled data at research of a thermal capacity of soils are given.

© PNRPU

С целью повышения несущей способности грунтовых оснований, укрепления откосов и стенок котлованов в слабых водонасыщенных грунтах, защиты существующих зданий и сооружений от просадок, а также при проходке подземных выработок применяется закрепление грунтов. Там, где нет возможности использовать традиционные технологии стабилизации грунтов, применяется способ естественного или искусственного замораживания грунтов [1]. Данный метод обеспечивает создание водонепроницаемой стенки, которая, кроме давления воды, также будет воспринимать давление грунта.

Метод искусственного замораживания грунта широко применяется за рубежом в качестве специального способа производства работ при подземном строительстве в сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях и, как показывает мировая практика, является одним из универсальных. Проектирование таких способов для обоснования применения замораживания и искусственного закрепления грунтов требует проведения необходимых расчетов, в частности теплотехнических [2].

Поскольку прочность и устойчивость грунта напрямую зависят от глубины промерзания, главной задачей является прогнозирование температурного режима грунта. Оценить процесс промерзания и оттаивания массива грунта возможно с помощью компьютерного моделирования, используя специализированное программное обеспечение, такое как GeoStudio TEMP/W. Исходными данными для указанной программы являются теплофизические свойства грунтов: теплопроводность и объемная теплоемкость в талом и мерзлом состоянии, суммарное влагосодержание, а также метеорологические данные [3, 4].

Теплофизические параметры грунтов в мерзлом и талом состоянии допускается определять по нормативным документам в зависимости от объемного веса и суммарной влажности грунта. Однако приведенные в них максимальные величины плотности и влажности грунта в большинстве случаев превышают значения параметров испытываемого грунта, и, таким образом, определение коэффициента теплопроводности и теплоемкость становится невозможным [6]. При этом в самой нормативной документации величины теплофизических характеристик представлены в качестве приближенных значений, что уже изначально дает неточность исходных данных. В свою очередь точность и правильность геокриологических прогнозов и теплотехнических расчетов во многом зависят от качества вводимых теплофизических параметров. Из этого следует необходимость определения теплофизических характеристик грунтов прямыми лабораторными методами, а также подробного изучения их технологии.

Лабораторное исследование будет проводиться на материально-технической базе экспертной лаборатории кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Коэффициент теплопроводности является показателем пропорциональности между величиной удельного теплового потока и градиентом температуры в грунте. Значения теплопроводности глинистого грунта, как правило, меньше песчаного, но увеличиваются с повышением содержания в нем влаги. Теплопроводность мерзлых грунтов значительно выше, чем талых, поскольку значение теплопроводности льда примерно в четыре раза выше, чем воды, содержащейся в порах грунта [7, 8].

Теплоемкость грунта характеризует его способность поглощать и удерживать в себе тепло. Различают удельную и объемную теплоемкость грунтов. Объемную теплоемкость получают путем умножения удельной теплоемкости на плотность грунта. Теплоемкость глинистых грунтов имеет более высокие значения по сравнению с песчаным и уменьшается с понижением температуры грунта [6, 7]. Для мерзлого и талого грунта удельная теплоемкость будет рассчитана по соответствующим формулам:

$$c_m = \frac{c_{ск} + c_l W_c + (c_b - c_l) W_n}{1 + W_c} \quad (1)$$

$$c_t = \frac{c_{ск} + c_b W_c}{1 + W_c}, \quad (2)$$

где $c_{ск}$ – удельная теплоемкость минерального скелета грунта; c_b и c_l – удельные теплоемкости соответственно воды и льда; W_c – весовая влажность грунта; W_n – влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды.

На первом этапе лабораторного эксперимента разрабатывается схема проведения исследования. Другими словами, производится непосредственное планирование эксперимента, которое состоит из следующих этапов:

- 1) выбор входных и выходных параметров;
- 2) определение математической модели объекта исследования;
- 3) составление матрицы планирования эксперимента;
- 4) статистический анализ результатов и проверка адекватности модели.

Входным параметром называется величина, предположительно влияющая на результаты эксперимента – фактор. Каждое фиксированное значение, принимаемое фактором, име-

нуется его уровнем. Выходным параметром называется параметр оптимизации или отклик, который характеризует результат проведенного эксперимента и зависит от факторов. В результате эксперимента необходимо найти зависимость между параметром оптимизации и факторами – функцию отклика, которую можно записать в следующем виде [10]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (3)$$

где $x_1 \dots x_k$ – факторы, действующие на объект исследования; y – отклик системы.

Определение математической модели заключается в выборе вида функции отклика и составлении уравнения регрессии. На начальном этапе авторами предполагается, что модель объекта исследования является линейной и имеет вид полинома 1-й степени:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j, \quad (4)$$

где b_0 , b_i и b_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии.

Выбрав математическую модель, переходят к составлению матрицы планирования эксперимента, которая представляет собой таблицу, столбцы которой определяют значения факторов, а строки – условия опыта. Последний столбец таблицы отводится под значения откликов, которые определяются при заданных значениях факторов.

Для удобства обработки результатов проведенных экспериментов и дальнейшего определения коэффициентов уравнения регрессии необходимо преобразовать значения факторов к безразмерным величинам путем кодирования переменных по формуле [10]:

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta_i}, \quad (5)$$

где x_i – кодированное значение фактора; X_i – истинное значение фактора; X_0 – истинное значение нулевого уровня; Δ_i – интервал варьирования фактора.

Истинное значение нулевого уровня находится как половина суммы верхнего и нижнего уровня фактора. Интервал варьирования определяется как половина разницы между верхним и нижним пределом истинных значений фактора. Причем верхний уровень фактора равен (+1), нижний – (–1), а основной – нулю.

В данном эксперименте в качестве объекта исследования будут использоваться искусственно приготовленные образцы глинистых грунтов. Входными параметрами приняты: X_1 – показатель текучести глинистого грунта I_L , с уровнями фактора 0,3; 0,6 и 0,9; X_2 – температура образца T со значениями –10, –6, –2, +2, +6 и +10 °С. Выходными параметрами будут являться коэффициент теплопроводности Y_1 и удельная теплоемкость Y_2 . Таким образом, уравнение регрессии примет следующий вид:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{1,2} X_1 X_2, \quad (6)$$

где b_0 – значение Y в центре плана; b_1 и b_2 – коэффициенты, характеризующие степень влияния факторов X_1 и X_2 на отклик Y ; $b_{1,2} X_1 X_2$ – учитывает эффект влияния взаимодействия первого и второго фактора на Y , а $b_{1,2}$ характеризует степень этого влияния. План эксперимента представлен в таблице.

Матрица планирования эксперимента
 Matrix of experiment planning

| Номер опыта | Значения факторов | | | | Взаимодействие | Значения откликов | |
|-------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|----------------|------------------------------|--------------|
| | Показатель текучести | | Температура | | | Коэффициент теплопроводности | Теплоемкость |
| | кодированное значение | истинное значение | кодированное значение | истинное значение | | | |
| | x_1 | X_1 | x_2 | X_2 | | x_1x_2 | Y_1 |
| 1 | -1 | 0,3 | -1 | -10 | 1 | | |
| 2 | -1 | 0,3 | -0,6 | -6 | 0,6 | | |
| 3 | -1 | 0,3 | -0,2 | -2 | 0,2 | | |
| 4 | -1 | 0,3 | 0,2 | +2 | -0,2 | | |
| 5 | -1 | 0,3 | 0,6 | +6 | -0,6 | | |
| 6 | -1 | 0,3 | 1 | +10 | -1 | | |
| 7 | 0 | 0,6 | -1 | -10 | 0 | | |
| 8 | 0 | 0,6 | -0,6 | -6 | 0 | | |
| 9 | 0 | 0,6 | -0,2 | -2 | 0 | | |
| 10 | 0 | 0,6 | 0,2 | +2 | 0 | | |
| 11 | 0 | 0,6 | 0,6 | +6 | 0 | | |
| 12 | 0 | 0,6 | 1 | +10 | 0 | | |
| 13 | 1 | 0,9 | -1 | -10 | -1 | | |
| 14 | 1 | 0,9 | -0,6 | -6 | -0,6 | | |
| 15 | 1 | 0,9 | -0,2 | -2 | -0,2 | | |
| 16 | 1 | 0,9 | 0,2 | +2 | 0,2 | | |
| 17 | 1 | 0,9 | 0,6 | +6 | 0,6 | | |
| 18 | 1 | 0,9 | 1 | +10 | 1 | | |

Поскольку любой отдельный эксперимент имеет какую-либо погрешность, то с целью ее уменьшения для каждой строки таблицы планируется проводить $m = 3$ количество опытов, осреднение результатов которых даст возможность уменьшить неточности оценки истинного значения отклика в \sqrt{m} раз. Это также необходимо для проверки найденного уравнения регрессии на пригодность (адекватность). Для того чтобы убедиться в достоверности полученной зависимости и ее точности, необходимо провести статистический анализ уравнений регрессии, который заключается в проверке значимости их коэффициентов. Данная проверка будет проводиться с помощью критерия Стьюдента:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{\text{коэф}}}, \quad (7)$$

где t_i – критическая точка, сравниваемая с табличным значением для заданного уровня значимости; $S_{\text{коэф}}$ – среднее квадратическое отклонение коэффициентов.

Если расчетное значение критерия окажется меньше табличного, то данный коэффициент незначим и его исключают из уравнения регрессии.

В дальнейшем, если после обработки результатов выяснится, что разработанная модель неадекватна, то будет принято решение перейти к квадратичной модели полинома 2-й степени и оценить пригодность новой математической модели.

Величину удельной теплоемкости минерального скелета грунта планируется определять экспериментально методом калориметрирования, используя жидкостный калориметр. Суть данного метода состоит в измерении изменения во времени температуры жидкости

определенной массы в калориметре, в который помещен образец, выделяющий или поглощающий теплоту [11]. В целом конструкция калориметра представляет собой калориметрический сосуд – оболочку, в центре которого помещается второй сосуд меньшего размера – калориметрическая система. Оболочка калориметра должна быть тщательно изолирована от окружающей среды, чтобы исключить дополнительные погрешности измерений. Поэтому калориметрический сосуд будет выполнен с двойными стенками, пространство между которыми планируется заполнить теплоизоляционным материалом – пенопластом. Предварительная условная схема жидкостного калориметра представлена на рис. 1.

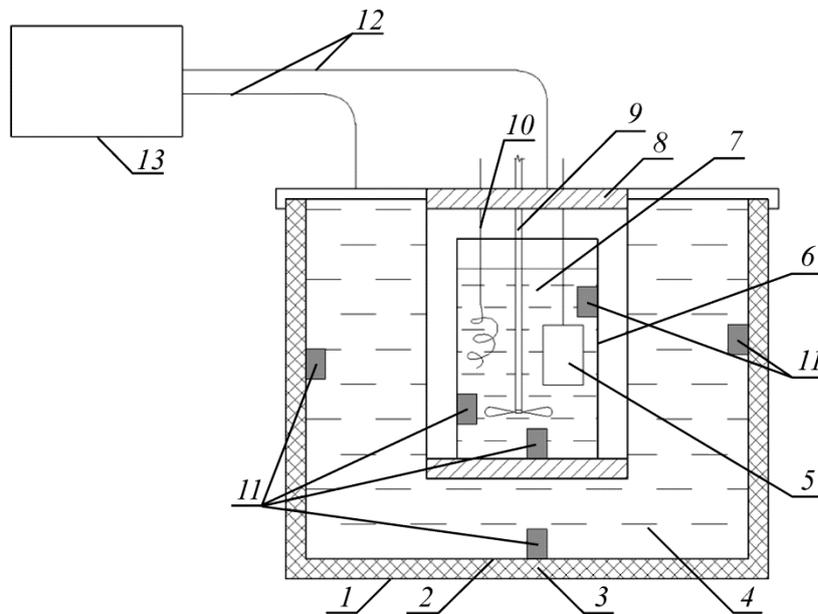


Рис. 1. Условная схема жидкостного калориметра: 1 – наружная стенка калориметрического сосуда; 2 – внутренняя стенка сосуда; 3 – теплоизоляционный материал; 4 – жидкость оболочки; 5 – бюкс с образцом грунта; 6 – калориметрический стакан; 7 – жидкость в калориметрической системе (вода); 8 – крышка; 9 – мешалка; 10 – нагреватель; 11 – термометры сопротивления; 12 – провода; 13 – регистратор
Fig. 1. Conditional schematic view of the liquid calorimeter: 1 – the outer wall of the calorimeter vessel; 2 – the inner wall of the vessel; 3 – thermal insulating material; 4 – liquid envelope; 5 – weighing bottle with the sample of soil; 6 – calorimetric container; 7 – calorimetric fluid (water); 8 – cover; 9 – mixer; 10 – heater; 11 – resistance thermometers; 12 – wires; 13 – logger

Существуют различные режимы калориметрических измерений:

- изометрический;
- адиабатический;
- изопериболический;
- сканирующий.

В нашем случае предполагается использовать изопериболический калориметр, т.е. с изотермической оболочкой. При таком режиме работы температура оболочки поддерживается постоянной, а температура жидкости калориметрической системы вследствие теплообмена с оболочкой изменяется в течение некоторого времени до установления равновесия [11]. В качестве жидкости в оболочке калориметра и калориметрической жидкости будет использоваться дистиллированная вода.

Охлаждение образцов до необходимой температуры планируется осуществлять в термостате, который по конструкции аналогичен калориметру. Термостат будет выдерживаться в холодильной камере при температуре на 4° ниже опытной. Оболочка термостата заполняется незамерзающей жидкостью. Чтобы уменьшить влияние циклов включения-выключения холодильной камеры при охлаждении [12], пространство стакана для выдерживания образцов грунта заполняется песком. Предварительная схема термостата представлена на рис. 2.

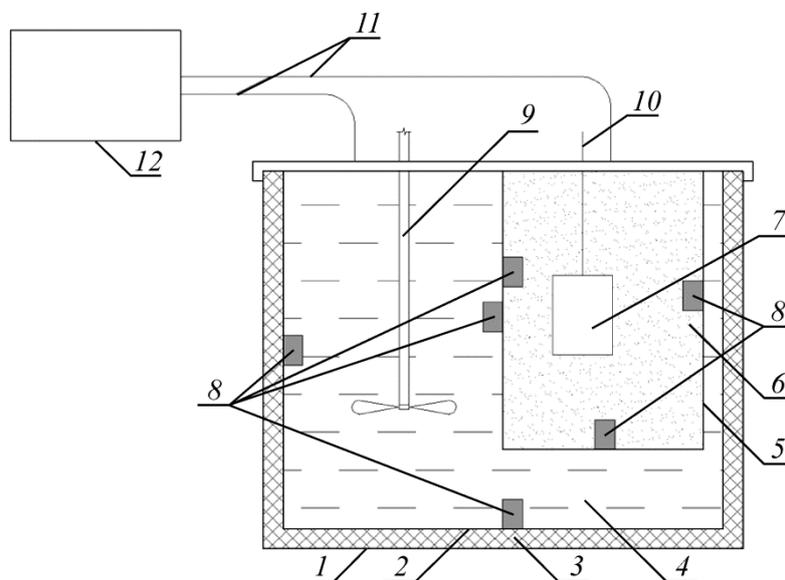


Рис. 2. Условная схема термостата: 1 – наружная стенка; 2 – внутренняя стенка; 3 – теплоизоляционный материал; 4 – незамерзающая жидкость; 5 – стакан для выдерживания образцов; 6 – песок; 7 – бюкс с образцом грунта; 8 – термометры сопротивления; 9 – мешалка; 10 – нитка, удерживающая бюкс; 11 – провода; 12 – регистратор
Fig. 2. Conditional schematic view of the thermostat: 1 – the outer wall; 2 – the inner wall; 3 – heat-insulating material; 4 – non-freezing fluid; 5 – container for holding samples of soil; 6 – sand; 7 – weighing bottle with the sample of soil; 8 – resistance thermometers; 9 – mixer; 10 – thread that holds the weighing bottle; 11 – wires; 12 – logger

Калориметрический эксперимент разделяется на три периода [3], в течение которых через каждую минуту производят отсчеты температуры. Для замеров температуры предполагается использовать термопреобразователи сопротивления (датчики температуры) с допустимым отклонением $\pm 0,3^{\circ}\text{C} + 0,005$ от измеряемой температуры.

«Начальный» период проходит первые 10 мин опыта. За это время проверяется постоянство изменения температуры калориметрической жидкости. На последней минуте начального периода из термостата достают образец с заданной температурой и опускают в калориметрическую систему. «Главный» период длится от момента погружения образца до начала равномерного изменения температуры калориметрической жидкости или изменения ее «хода» на обратный. «Конечный» период составляет около 10 мин после главного, за это время также поминутно фиксируют значения температуры. По окончании всех измерений исследуемый образец взвешивают.

Для обработки данных калориметрического опыта необходимо установить поправку на теплообмен с окружающей средой и определить тепловое значение калориметра [3]. Поправку на теплообмен вычисляют по формуле Реньо – Пфаундлера – Усова:

$$\Delta\vartheta = n\nu_0 + \frac{\nu_n - \nu_0}{\theta_n - \theta_0} \cdot \left(\frac{\vartheta_n - \vartheta_0}{2} + \sum_1^{n-1} \vartheta - n\theta_0 \right), \quad (8)$$

где n – число отсчетов в главном периоде опыта; ν_n и ν_0 – средний «ход» температуры за один отсчет соответственно в начальном и конечном периоде; θ_n и θ_0 – средняя температура начального и конечного периода; ϑ_n и ϑ_0 – последний отсчет главного и начального периода (температура равновесия); $\sum_1^{n-1} \vartheta$ – сумма температур калориметра всех отсчетов главного периода, за исключением последнего отсчета ϑ_n .

С учетом поправки на теплообмен последний отсчет главного периода принимается следующим: $\vartheta'_n = \vartheta_n + \Delta\vartheta$.

Тепловое значение калориметра представляет собой теплоемкость калориметрической системы и характеризует чувствительность калориметра. Для вычисления теплового значения калориметра проводят его градуировку электрическим током. Калориметрической жидкости сообщают количество теплоты Q путем ее электронагрева в течение 10 мин и измеряют изменение температуры жидкости ΔT с учетом поправки на теплообмен. Количество сообщенной нагревателем энергии вычисляют исходя из его характеристик силы тока и напряжения, а также времени пропускания электрического тока. Тепловое значение калориметра вычисляют по формуле

$$k = \frac{Q}{\Delta T} - c_k g_k, \quad (9)$$

где g_k и c_k – соответственно вес и удельная теплоемкость калориметрической жидкости.

По результатам калориметрического опыта удельная теплоемкость минерального скелета грунта исследуемого образца вычисляется по формуле

$$c_{ск} = \frac{(k + c_k g_k)(\theta'_0 - \theta'_n) - (c_б g_б + c_r g_r)(\theta'_n - \theta_{обр})}{g_{обр}(\theta'_n - \theta_{обр})}, \quad (10)$$

где θ'_0 и θ'_n – соответственно начальная и конечная температура жидкости в калориметрическом стакане с учетом поправки на теплообмен; $\theta_{обр}$ – начальная температура образца; $c_б$ и c_r – удельные теплоемкости соответственно материала бюкса и герметика; $g_{обр}$, $g_б$ и g_r – вес образца грунта, бюкса и герметика.

Полученное значение удельной теплоемкости подставляется в формулы (1) и (2) для вычисления теплоемкости грунта исследуемого образца в мерзлом и талом состоянии.

Определение коэффициента теплопроводности исследуемого грунта будет производиться с помощью прибора МИТ-1, работа которого основана на нестационарном методе. Принцип действия прибора заключается в установлении разницы температур измерительного зонда за определенное время при нагреве его постоянной мощностью [13].

Средняя температура, при которой будут измеряться образцы, принимается как средняя температура в начале и в конце замера. Подготовка образцов перед началом испытания заключается в их замораживании в холодильной камере. Поскольку измерительный зонд должен иметь одинаковую температуру с испытываемым образцом, принято решение перед замораживанием образца вставлять в него зонд и выдерживать их совместно при постоянной отрицательной температуре, соответствующей заданной температуре измерения образца. Для поддержания необходимой температуры при измерении теплопроводности принято решение помещать образцы в термостат, представляющий собой ящик из пенопласта, пространство внутри которого обшито фольгой.

Суммарная влажность мерзлого грунта будет определяться по ГОСТ 5180–84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» на образцах глинистого грунта массой 1–1,5 кг. Перед началом испытания образцы выдерживают в холодильном шкафу при постоянной отрицательной температуре в течение суток. Целесообразно для предотвращения высыхания и изменения естественной влажности грунта в холодильной камере оборачивать образцы пленкой. Замороженный грунт помещают в чашку m_1 , в которой он будет оттаивать, и взвешивают чашку m_3 . После того как образец оттаял, его путем добавления воды доводят до состояния, близкого к границе текучести. Полученную пасту взвешивают вместе с чашкой m_2 и отбирают пробы для определения влажности перемешанного грунта w методом высушивания до постоянной массы. Суммарная влажность будет вычислена по следующей формуле:

$$w_{tot} = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1} (100 + w) - 100. \quad (11)$$

Влажность грунта за счет незамерзшей воды планируется определять согласно требованиям [3] для незасоленных грунтов.

Таким образом, по полученным данным необходимо рассчитать коэффициенты уравнения регрессии и провести их оценку, установить закономерности изменения теплопроводности и теплоемкости глинистого грунта от его консистенции и температуры, построить соответствующие графики зависимости. Также, задавшись исходными данными теплотехнических характеристик, полученных в ходе лабораторного эксперимента, необходимо смоделировать глубину промерзания и оттаивания склона, сложенного глинистыми грунтами. Прогнозирование теплового процесса будет осуществляться с помощью программы GeoStudio TEMP/W для глинистого грунта различной консистенции.

Библиографический список

1. Шагиев А.А., Пономарев А.Б. Стабилизация грунта методом искусственного замораживания [Электронный ресурс] // Электронный интернет-журнал «Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии». – 2012. – № 1. – URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=1&s=97> (дата обращения: 28.12.2015).
2. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям для подземного гражданского и промышленного строительства. – М.: Стройиздат, 1987. – 57 с.
3. Моделирование сезонного промерзания земляного полотна автомобильной дороги / А.М. Бургонутдинов, К.Р. Кашапова, В.И. Клевико, О.В. Моисеева // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Пермь, 2015. – Т. 1. – С. 346–350.

4. Пономарев А.Б., Захаров А.В. О некотором подходе к прогнозу осадок оснований на техногенных грунтах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 1. – С. 151–161.
5. Жолобов И.А. Влияние нелинейности теплофизических свойств мерзлых грунтов на динамику теплосилового взаимодействия с горячим подземным трубопроводом: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2015. – 151 с.
6. Khaled A., Alnefaie and Nidal H., Abu-Hamdeh. Specific Heat and Volumetric Heat Capacity of Some Saudian Soils as affected by Moisture and Density // Proceedings of the 2013 International Conference on Mechanics, Fluids, Heat, Elasticity and Electromagnetic Fields. – 2013. – P. 139–143.
7. Farouki O.T. Thermal properties of soils. – Hanover, New Hampshire: US Army corps of engineers, Cold regions research and engineering laboratory. – 1981. – 150 с.
8. Effects of aggregate size on soil thermal conductivity: Comparison of measured and model-predicted data / B. Usowicz, J. Lipiec, J. Usowicz, W. Marczewski // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – № 2. – P. 536–541.
9. Гаврильев Р.И., Кузьмин Г.П. Определение теплофизических характеристик мерзлых грунтов расчетным методом // Наука и образование. – 2009. – № 4. – С. 51–54.
10. Шеин Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
11. Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент: метод. указания для самостоятельной работы студентов. – Новосибирск, 2010. – 36 с.
12. Хеммингер В., Хёне Г. Калориметрия. Теория и практика. – М.: Химия, 1990. – Пер. изд.: ФРГ, 1984. – 176 с.
13. Григорьев Б.В., Шабаров А.Б. Экспериментальное исследование промерзания-оттаивания грунтов в неравновесных условиях // Вестник Тюменского государственного университета. – 2012. – № 4. – С. 53–60.
14. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. – М., 1973. – 194 с.
15. Медведев Д.П., Захаров А.В. Планирование эксперимента по определению теплопроводности песчаных грунтов экспериментальными методами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2013. – № 4. – С. 109–115.

References

1. Shagiev A.A., Ponomarev A.B. Stabilizatsiia grunta metodom iskusstvennogo zamorazhivaniia [Soil stabilization by artificial freezing]. *Jelektronnyj internet zhurnal "Stroitel'stvo i arhitektura. Opyt i sovremennye tehnologii"*, 2012, no. 1, available at: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=1&s=97>.
2. Rekomendatsii po inzhenerno-geologicheskim izyskaniiam dlia podzemnogo grazhdanskogo i promyshlennogo stroitel'stva [Recommendations on engineering-geological research for underground civil and industrial construction]. Moscow: Stroizdat, 1987. 57 p.
3. Burgonutdinov A.M., Kashapova K.R., Kleveko V.I., Moiseeva O.V. Modelirovanie sezonnogo promerzaniia zemlianogo polotna avtomobil'noi dorogi [Modeling seasonal freezing subgrade of the road]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm', 2015, vol. 1, pp. 346-350.
4. Ponomarev A.B., Zakharov A.V. O nekotom podpkhode k prognozu osadok osnovanii na tekhnogennykh gruntakh [On some approaches to base settlements forecast for technogenic soil]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 1, pp. 151-161.
5. Zholobov I.A. Vliianie nelineinosti teplofizicheskikh svoistv merzlykh gruntov na dinamiku teplosilovogo vzaimodeistviia s goriachim podzemnym truboprovodom [The influence of the nonlinearity of the thermophysical properties of frozen soils on the dynamics of thermal interaction with a hot underground pipeline]. Ph.D. Thesis, Tiumen', 2015. 151 p.
6. Khaled A., Alnefaie and Nidal H., Abu-Hamdeh. Specific Heat and Volumetric Heat Capacity of Some Saudian Soils as affected by Moisture and Density. *Proceedings of the 2013 International Conference on Mechanics, Fluids, Heat, Elasticity and Electromagnetic Fields*, 2013, pp. 139-143.
7. Farouki O.T. Thermal properties of soils. Hanover, New Hampshire: US Army corps of engineers, Cold regions research and engineering laboratory, 1981. 150 p.

8. Usowicz B., Lipiec J., Usowicz J., Marczewski W. Effects of aggregate size on soil thermal conductivity: Comparison of measured and model-predicted data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, no. 2, pp. 536-541.
9. Gavril'ev R.I., Kuz'min G.P. Opredelenie teplofizicheskikh harakteristik merzlykh gruntov raschetnym metodom [Determination of thermophysical characteristics of frozen ground calculation method]. *Nauka i obrazovanie*, 2009, no. 4, pp. 51-54.
10. Shein E.V. Kurs fiziki pochv [Course of earth physics]. Moskovskii gosudarstvennyi universitet, 2005. 432 p.
11. Sokolovskaia I.Iu. Polnyi faktornyi eksperiment [A complete factorial experiment]. Novosibirsk, 2010. 36 p.
12. Khemminger V., Khene G. Kalorimetriia. Teoriia i praktika [Calorimetry. Theory and practice]. Moscow: Khimiia, 1990. 176 p.
13. Grigor'ev B.V., Shabarov A.B. Eksperimental'noe issledovanie promerzaniia-ottaivaniia gruntov v neravnovesnykh usloviakh [Experimental research of freezing and thawing in soils non-equilibrium conditions]. *Vestnik Tiimenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 53-60.
14. Rukovodstvo po opredeleniiu fizicheskikh, teplofizicheskikh i mekhanicheskikh kharakteristik merzlykh gruntov [Guidance on the determination of the physical, thermal and mechanical characteristics of frozen soils]. Moscow, 1973. 194 p.
15. Medvedev D.P., Zakharov A.V. Planirovanie eksperimenta po opredeleniiu teploprovodnosti peschanykh gruntov eksperimental'nymi metodami [Design of experiments to determine the thermal conductivity of sandy soils experimental methods]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2013, no. 4, pp. 109-115.