

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ  
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 53.082.6

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ  
В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

© 2020 г. Б. В. Григорьев

Поступила в редакцию 09.10.2019 г.

После доработки 16.10.2019 г.

Принята к публикации 18.10.2019 г.

DOI: 10.31857/S0032816220020019

При замерзании грунта часть грунтовой воды не претерпевает фазового превращения при отрицательных температурах [1, 2]. Количество незамерзшей воды зависит от типа грунта и температуры и оно тем больше, чем больше его дисперсность. При большой дисперсности грунта, содержащего глинистые и особенно коллоидные частицы, удельная площадь их поверхности, связывающая поровую воду, велика [2].

В данной работе предложен метод определения содержания незамерзшей воды [3] в мерзлых грунтах, суть которого заключается в фиксации и учете количества энергии, которую надо удалить из образца при его замораживании.

Экспериментальная установка с внешним контуром охлаждения [4] содержит криостат с встроенным перекачивающим насосом, необходимый для охлаждения до заданной температуры термостатирующей жидкости в диапазоне от 0 до  $-25^{\circ}\text{C}$ , циркуляционный блок, в рабочей камере которого происходит замораживание образца, аналого-цифровой преобразователь, теплоизолированные трубопроводы для соединения криостата и циркуляционного блока в единый контур, термометры сопротивления и датчик теплового потока.

Рабочая часть циркуляционного блока представляет собой камеру 1 с внутренним диаметром 107 мм, состоящую из теплоизолированного циркуляционного контура 2 (рис. 1), в стенках которого циркулирует теплоноситель. В камере циркуляционного контура расположен термометр сопротивления ТСП Pt100.

Бюкс для грунта (рис. 2) изготовлен из нержавеющей стали и представляет собой цилиндрический сосуд 1 диаметром 40, высотой 105, с толщиной стенки 1 мм и с крышкой. На боковой стороне бюкса расположен датчик теплового потока 2, который фиксирует до 91% площади теплообмена между грунтом и камерой, оставшаяся площадь теплоизолируется. По центру бюкса в грунт вставлен термометр сопротивления 4, данные с которого, как и с датчика теплового потока, поступают

на аналого-цифровой преобразователь, где преобразуются и выводятся на экран монитора.

Во время эксперимента происходит медленное замораживание влажного грунта. Для этого в криостате с использованием испарительного блока устанавливается заданная отрицательная температура, что приводит к охлаждению теплоносителя. Теплоноситель при помощи встроенного насоса циркулирует по циркуляционному контуру, охлаждая внутреннее пространство камеры.

Формула для нахождения массы льда в образце при температуре окончания замораживания  $t_x$  имеет вид

$$m_{\text{л}} = \frac{\sum_{\tau_2}^{\tau_5} (q_i \Delta \tau_i) - (t_3 - t_x)(c_{\text{г}} m_{\text{г}} + c_{\text{в}} m_{\text{в исх}} + c_{\text{б}} m_{\text{б}} + c_{\text{п}} m_{\text{п}})}{L_{\text{ф}} + t_x(c_{\text{в}} - c_{\text{л}})},$$

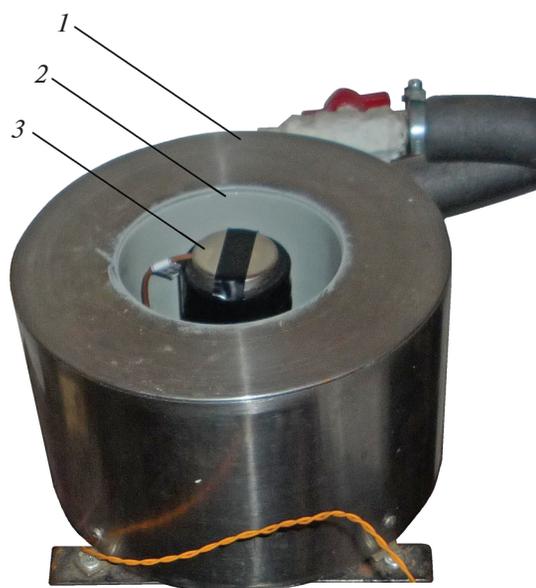


Рис. 1. Циркуляционный блок. 1 – корпус; 2 – циркуляционный контур; 3 – бюкс с образцом.



**Рис. 2.** Бюкс с грунтом. 1 – бюкс; 2 – датчик теплового потока; 3 – исследуемый грунт; 4 – термометр сопротивления.

где  $q_i$ , Вт – тепловой поток за интервал времени  $\Delta\tau_i$  [с];  $\tau_2$  – время начала кристаллизации воды в порах грунта;  $\tau_5$  – время окончания эксперимента, когда температура образца становится равной температуре рабочей камеры, а плотность теплового потока равной нулю;  $c_p$ , Дж/(кг · К) – теплоемкость материала датчика теплового потока, находящегося в контрольном объеме;  $c_r$ ,  $c_b$ ,  $c_l$  и  $c_g$  [Дж/(кг · К)] – соответственно теплоемкость сухого грунта, воды, льда и материала бюкса;  $m_r$ , кг – масса датчика теплового потока;  $m_g$ ,  $m_{в\text{исх}}$ ,  $m_l$  и  $m_b$  [кг] – масса грунта, воды исходной, льда и бюкса;  $L_f$ , Дж/кг – теплота фазового перехода;  $t_3$  – температура начала замерзания грунта. Исходная масса воды в образце  $m_{в\text{исх}}$  определяется стандартным методом высушивания грунта до постоянной массы после эксперимента с охлаждением [5]. Масса неза-

мерзшей воды, содержащейся в грунте при температуре  $t_x$ , находится как разность массы воды исходной и массы льда в образце при температуре  $t_x$ .

Для подтверждения достоверности получаемых данных проведен сравнительный анализ результатов, полученных двумя разными экспериментальными методами – калориметрическим методом и методом на основе измерения теплового потока в интервале от  $-0.2$  до  $-13^\circ\text{C}$  для сушки с влажностью 23.4%. Различия определения незамерзшей воды в интервале температур от  $-1.5$  до  $-13^\circ\text{C}$  составляют  $<0.5\%$ . В интервале от  $-0.2$  до  $-1.5^\circ\text{C}$  максимальное различие между данными составляет 5%. Аналогичный сравнительный анализ для мелкозернистого песка показал максимальное отличие не более 1.5%. При этом нужно учитывать, что любой грунт является сложной гетерогенной многокомпонентной системой, и результаты, получаемые при определении большинства физических характеристик грунта, относятся к категории труднопроизводимых.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ СП-3897.2018.1.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ершов Э.Д.* Общая геокриология. М.: Недра, 1990.
2. *Цытович Н.А.* Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973.
3. Новые методы исследования состава, строения и свойств мерзлых грунтов / Под ред. С.Е. Гречищева, Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1983.
4. *Григорьев Б.В., Шабаров А.Б.* Патент на полезную модель № 141361 RU // Оpubл. 27.05.2014. Бюл. № 15.
5. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2016.

*Адрес для справок: Россия, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Тюменский государственный университет, Физико-технический институт. E-mail: b.v.grigorev@utmn.ru*