

© Б.В. ГРИГОРЬЕВ, А.Б. ШАБАРОВ

Raskatov_@mail.ru, TU3818@mail.ru

УДК 536: 551.343.74

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОМЕРЗАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ ГРУНТОВ
В НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ**

АННОТАЦИЯ. В статье приведено описание экспериментальной установки и результаты экспериментальных исследований содержания незамерзшей воды в грунте при равновесном и неравновесном состоянии в системе грунт–вода–лед. Приведена аппроксимация полученных результатов.

SUMMARY. The paper describes the experimental system and results of the experimental studies of unfrozen water content in the soil at equilibrium and disequilibrium states in the system soil-water-ice. The approximation of the results is shown.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Экспериментальная установка, незамерзшая вода, мерзлый грунт, неравновесные процессы.

KEY WORDS. The experimental system, unfrozen water, frozen ground, non-equilibrium processes.

Освоение районов Крайнего Севера — строительство промышленных и гражданских объектов, дорог, нефте- и газопроводов, бурение скважин невозможно без изучения многолетнемерзлых и промерзающих грунтов, являющихся сложными многокомпонентными системами, одним из компонентов которых является вода. Фазовый состав поровой воды, процессы ее замерзания и оттаивания во многом определяют структуру, свойства, механическое и тепловое состояние массивов мерзлых дисперсных систем [1].

Известно, что не вся поровая вода при охлаждении грунта ниже 0°C переходит в лед, определенное ее количество остается в незамерзшем состоянии при каждой отрицательной температуре (вплоть до -70 °C) [2].

Температура замерзания различных грунтов нарушенной структуры в лабораторных условиях подробно исследовалась П.И. Андриановым [2], который показал, что при охлаждении образца грунта вначале наблюдается переохлаждение, затем резкое повышение температуры в отрицательной области — скачок вследствие выделения скрытой теплоты льдообразования; наконец, после достижения определенной температуры — температуры замерзания происходит замораживание всего образца. Высшая и наиболее устойчивая температура, наблюдаемая при температурном скачке, соответствует температуре замерзания грунта. Различные грунты имеют разную температуру замерзания, (0 — -2,5°C и несколько ниже), под которой понимают устойчивую температуру замерзания поровой воды после температурного скачка. Этот процесс сопровождается увеличением объема грунта, льдовыделением, смерзаемостью его частиц и прочим. Решающий этап количественных измерений незамерзшей воды в мерзлых грун-

тах связан с внедрением в практику исследования калориметрического метода [3], [4]. С его помощью многими исследователями экспериментально был установлен факт монотонного снижения количества незамерзшей воды с понижением температуры образцов и укрупнением фракционного состава. Характерный пример такого изменения приведен на рис. 1.

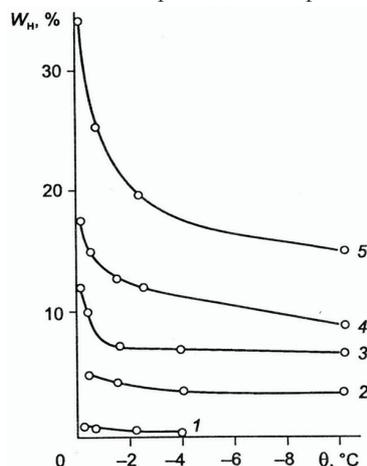


Рис. 1. Кривые содержания незамерзшей воды в зависимости от величины отрицательной температуры [2]:
1-кварцевый песок; 2-супесь; 3-суглинок;
4-глина; 5-глина содержащая монтмориллонит

Для исследования процессов заморзания-оттаивания в разных типах грунтов на кафедре механики многофазных систем ТюмГУ создана экспериментальная установка, предназначенная для определения количества незамерзшей воды калориметрическим методом.

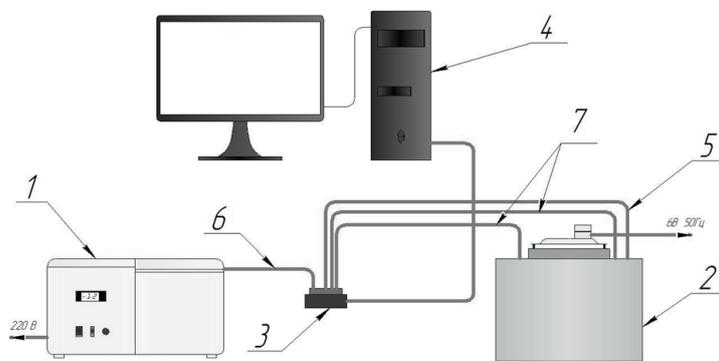


Рис. 2. Экспериментальная установка

Установка включает в себя следующие элементы (рис. 2): термостат — 1; калориметр — 2; платиновые термометры сопротивления — 6, 7, 5; аналогово-цифровой преобразователь — 3; компьютер — 4; бюксы для грунта; три стакана на различного диаметра; весы электронные.

Термостат (рис. 2) служит для замораживания образца грунта до заданной отрицательной температуры в диапазоне от 0 — -20°C (непродолжительно от -20°C до -30°C). Внутреннее пространство термостата разделено на два отсека — технический и рабочий. В техническом отсеке размещены компрессор, конденсатор с клапаном Шредера, осушительный патрон, помпа, микроконтроллер, выключатели и тумблеры. Пространство рабочего отсека занимает испаритель, окруженный слоем изоляционного материала. Термостат имеет возможности визуального наблюдения температуры термостатирующей жидкости, изменения температурного дифференциала, слива термостатирующей жидкости а также подключения внешнего контура охлаждения.

Калориметр (рис. 2) служит для определения теплового эффекта при оттаивании образцов мерзлого грунта. Он представляет собой два прямоугольных пластиковых сосуда, вставленных один в другой и разделенных слоем изоляции. Внутренний сосуд заполнен калориметрической жидкостью — дистиллированной водой. Датчиками температуры выступают два термометра сопротивления, закрепленные на внутренней стенке. Калориметр помещен в оболочку, также выполненную в виде прямоугольного сосуда с двойными стенками, между которыми находится изоляционный материал — пенопласт. Внешняя сторона также покрыта жидким изоляционным покрытием, которое одновременно выполняет функцию дополнительной теплоизоляции и защищает металлическую стенку от коррозии. Внутреннее пространство оболочки заполнено водой объемом 11,5 литров. Масса воды в оболочке калориметра уменьшает теплообмен с окружающей средой. В крышку калориметра вмонтирована пропеллерная мешалка (скорость вращения 0,5 об/сек.), предназначенная для перемешивания калориметрической жидкости.

Бюкса для исследуемого грунта представляет собой цилиндрический сосуд диаметром 40 мм высотой 70 мм, толщиной стенки 1 мм и крышка с отверстием для термометра сопротивления, изготовленные из нержавеющей стали.

Три стакана разного диаметра необходимы для изменения времени охлаждения образца до одной и той же температуры. Два из них имеют двойные стенки, пространство между которыми заполнено сухим песком. Это необходимо для уменьшения влияния циклов «включение — выключение» компрессора при охлаждении, а также увеличения времени охлаждения образца.

Эксперимент проводился следующим образом. Для определения количества незамерзшей воды использовались образцы грунтов нарушенного сложения и образцы грунтов естественного сложения с природной влажностью. В ходе проведенных экспериментов установлено, что мелкодисперсный грунт (глина, суглинок) удобнее использовать в состоянии естественного сложения, а крупнодисперсный (песок) как в естественном, так и нарушенном сложении. Бюксы заполняют исследуемым грунтом под некоторым усилием для устранения воздушных прослоек и пустот, после чего закрывают крышкой и вставляют термометр сопротивления по центру бюксы. Далее бюкс помещают в стакан, который находится в камере испарителя термостата. Внутреннее пространство камеры заполнено незамерзающей жидкостью (тосол), что способствует плавному охлаждению и длительному поддержанию заданной температуры.

Включают термостат и выставляют требуемую отрицательную температуру. В зависимости от диаметра стакана, типа грунта и первоначальной влажности замораживание длится 1-6 часов.

На рис. 3, в качестве примера, изображен график изменения температуры образца, полученный в ходе проведения эксперимента. Исследуемый грунт — глина, весом 127,1 гр. с влажностью 20%. Температура переохлаждения $t_{п}$ равна $-1,18^{\circ}\text{C}$, температура замерзания грунта $t_{з}$ равна, в среднем $-0,14^{\circ}\text{C}$. В ходе проведенных экспериментов установлено, что величина $t_{п}$ не является постоянной. Ее значения изменялись в интервале $-0,1^{\circ}\text{C}$ до $-2,5^{\circ}\text{C}$ в зависимости от скорости охлаждения.

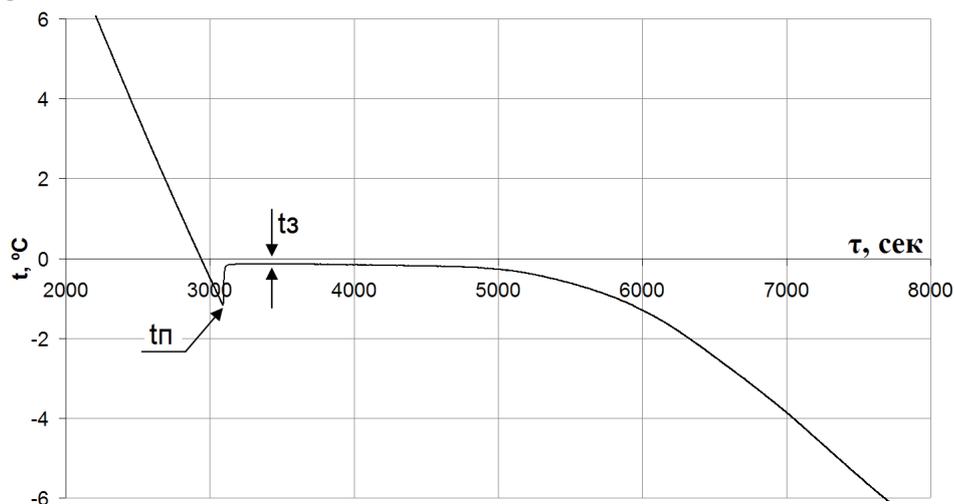


Рис. 3. Характерная кривая изменения температуры образца в процессе охлаждения

Калориметр заполняют водой и калориметрической жидкостью. Важно, чтобы температура калориметрической жидкости перед началом эксперимента была выше температуры воды в оболочке на $2-3^{\circ}\text{C}$. За $15-20$ мин. до начала опыта включают мешалку для выравнивания температуры воды в калориметрическом стакане в течение 5 минут.

Калориметрический опыт включает три периода, в течение которых производят отсчеты температуры по термометрам сопротивления. Первые $10-15$ мин. составляют «начальный» период опыта, когда проверяется постоянство «хода температуры калориметрической жидкости». После чего образец извлекают из термостата и помещают в калориметр. «Главный» период опыта — от момента погружения образца в калориметр до начала равномерного изменения температуры калориметрической жидкости или изменения ее хода на обратный, длительность его составляет $20-25$ минут.

«Конечный» период — измерение температуры в течение $10-15$ мин. после окончания главного периода.

Бюкс с оттаявшим образцом грунта вынимают из калориметра и определяют вес и влажность образца.

Поправку на теплообмен с окружающей средой находят по формуле Реньо-Пфаундлера-Усова [4]:

$$\Delta(\Delta\vartheta) = n v_0 + \frac{v_n - v_0}{\Theta_n - \Theta_0} \cdot \left(\frac{\vartheta_n - \vartheta_0}{2} + \sum_1^{n-1} \vartheta - n \Theta_0 \right), \quad (1)$$

где $\Delta(\Delta\vartheta)$: — поправка на теплообмен; n — число отсчетов в главном периоде опыта; v_0 — средний «ход» температуры за один отсчет в начальном периоде; v_n — то же в конечном периоде; Θ_0 — средняя температура начального периода (сумма первого и последнего отсчетов, деленная на 2); Θ_n — то же для конечного периода; ϑ_0 — последний отсчет начального периода; ϑ_n — последний отсчет главного периода (температура равновесия); $\sum_1^{n-1} \vartheta$ — сумма температур калориметра всех отсчетов главного периода, за исключением последнего отсчета (ϑ_n).

Таким образом, величина температуры последнего отсчета главного периода с учетом поправки на теплообмен равна $\vartheta_n^I = \vartheta_n + \Delta(\Delta\vartheta)$.

На основании данных калориметрического опыта вычисляют содержание льда в образце при данной отрицательной температуре по формуле, являющейся следствием уравнения теплового баланса:

$$m_{\text{л}} = \frac{K(\vartheta_0 - \vartheta_n^I) - |t_{\Gamma 1} - t_{\Gamma 2}|(c_{\Gamma} m_{\Gamma} + c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{б}} m_{\text{б}})}{Q_{\phi} - |T_{\Gamma 1}|(c_{\text{в}} - c_{\text{л}})}, \quad (2)$$

где K [кДж/К] — тепловое значение калориметра, c_{Γ} , $c_{\text{в}}$, $c_{\text{л}}$, $c_{\text{б}}$ [кДж/кгК] — соответственно теплоемкость сухого грунта, воды, льда и материала бюкса; m_{Γ} , $m_{\text{в}}$, $m_{\text{л}}$, $m_{\text{б}}$ [кг] — масса грунта, воды исходная, льда и бюкса; Q_{ϕ} [кДж/кг] — теплота фазового перехода; $|t_{\Gamma 1} - t_{\Gamma 2}|$, $(\vartheta_0 - \vartheta_n^I)$ — изменение температуры образца и калориметрической жидкости в ходе эксперимента.

Вес замерзшей воды при данной отрицательной температуре $m_{\text{н}}$ находят по разности

$$m_{\text{н}} = m_{\text{в}} - m_{\text{л}}. \quad (3)$$

Тепловой параметр калориметра K [кДж/К], определяют в ходе дополнительного эксперимента в процессе электронагрева, пропуская в течение 10-12 мин. через нагреватель электрический ток:

$$K = \frac{U^2}{R(\vartheta_n^I - \vartheta_0)\tau}, \quad (4)$$

где U — напряжение [В]; R — электрическое сопротивление нагревателя [Ом]; τ — время пропускания электрического тока [сек]; $(\vartheta_n^I - \vartheta_0)$ — изменение температуры калориметрической жидкости в результате электронагрева (с учетом поправки на теплообмен).

В ходе проводимых экспериментов грунт замораживался до различных температур в интервале $-0,5^{\circ}\text{C}$ — -13°C . Каждый раз замораживание длилось 3-3,5 часа, после чего проводили калориметрический опыт.

В результате получен ряд значений массы незамерзшей воды (табл. 1), соответствующий величинам отрицательной температуры. Также вычислены по формуле (1) поправки на теплообмен для каждого эксперимента.

Таблица 1

Значения массы незамерзшей воды, соответствующие величинам отрицательной температуры

№ эксп	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{гр}, ^\circ\text{C}$	0	-0,63	-0,70	-1,19	-1,97	-3,86	-4,61	-5,69	-6,98	-7,75	-12,08
$m_{л}, \text{кг}$	0,025	0,0107	0,0105	0,0078	0,0058	0,0043	0,0041	0,0038	0,0034	0,0033	0,0028
$W, \text{д.ед.}$	1	0,43	0,42	0,31	0,23	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,11
$\Delta(\Delta\nu)$	-	-0,016	0,021	-0,01	-0,039	0,047	-0,041	-0,018	-0,112	-0,017	-0,016

На рис. 4 показана зависимость изменения влажности за счет незамерзшей воды в фиксированном объеме грунта от температуры. Наиболее интенсивные фазовые превращения вода-лед происходят в диапазоне температур 0 — -3°C . Далее наблюдается плавное уменьшение содержания жидкой фазы стремящейся к постоянной величине, равной количеству прочносвязанной воды [5].

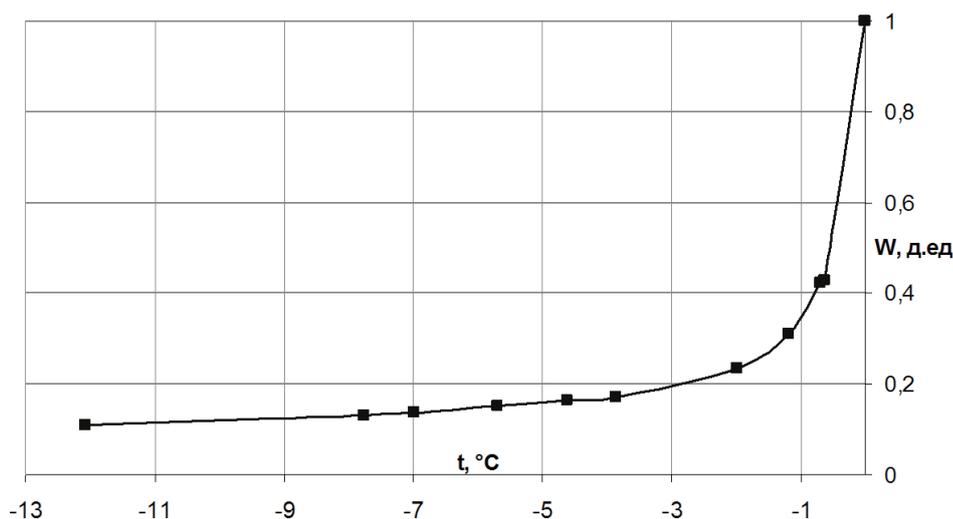


Рис. 4. Зависимость изменения содержания незамерзшей воды в грунте от температуры

Следует отметить, что точка ($t_{г1}=0^\circ\text{C}$, $W=1$) получена из начальных данных и условия что при 0°C вся вода в образце находится в жидком состоянии.

Аппроксимационная формула кривой (рис. 4) имеет вид:

$$W(t) = W_{осм} + (1 - W_{осм}) \cdot e^{\frac{t}{10} \cdot f(t)}, \quad (5)$$

где $W_{осм}$ — влажность грунта при $t = -10^\circ\text{C}$;

$$f(t) = 0,02031 \cdot t^3 + 0,47257 \cdot t^2 + 3,81804 \cdot t + 15,6808.$$

Различие между экспериментальными данными и значениями влажности, полученными по формуле (5), не превышает величину равную 0,03.

Многие исследователи [6] отмечают опытный факт влияния скорости охлаждения грунта на содержание незамерзшей воды. При быстром охлаждении грунта не достигается состояние фазового равновесия: система лед-вода находится в неравновесном состоянии.

Приведем результаты наших исследований, полученных с использованием разработанной установки. Для регулировки времени замораживания образца использовались три стакана разного диаметра. Эксперимент проводился также без стакана, с использованием только бюксы. При разных диаметрах а, следовательно, при разных термических сопротивлениях стаканов, и разной тепловой мощности отводимой от грунта, были получены 4 кривые зависимости содержания незамерзшей воды от температуры. Замораживание проводилось в течение 5; 3; 1 час и 16 минут (без стакана) что соответствует кривым 1; 2; 3 и 4 (рис. 5).

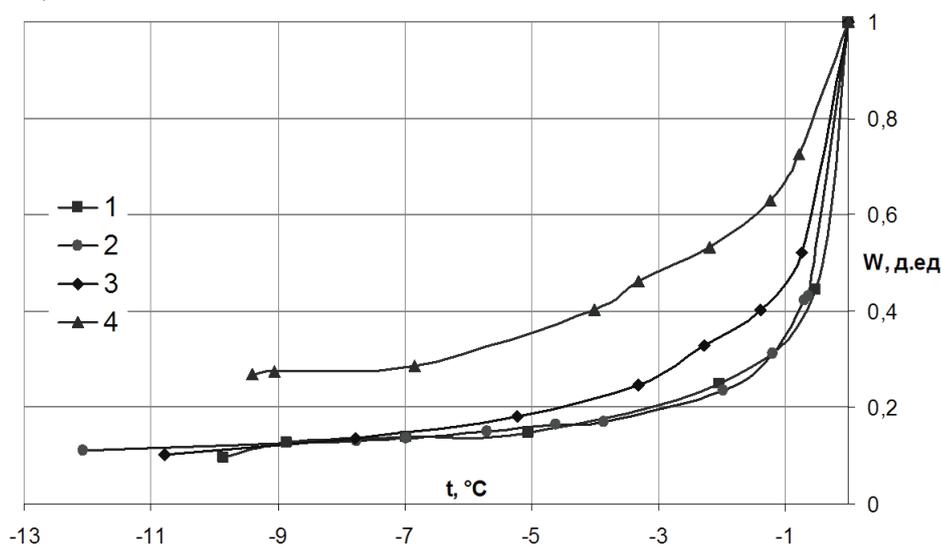


Рис. 5. Кривые зависимости незамерзшей воды от температуры при различном времени замораживания.

По представленным кривым можно судить о времени необходимом для наступления фазового равновесия. Отличие между кривыми 1 и 2 практически отсутствует, поэтому можно полагать, что в этих случаях происходит равновесный процесс заморзания воды в порах грунта.

Кривые 3 и 4 на рис. 5 соответствуют неравновесным условиям замораживания грунта. При этом влажность мерзлого грунта зависит не только от вида и температуры грунта, но и от интенсивности теплопереноса от грунта, в окружающую среду. В условиях рассматриваемого эксперимента параметром, характеризующим неравновесность фазового перехода вода-лед в грунте является отношение тепловой мощности q [Вт], отводимой от массы m мерзлого грунта в контрольном объеме, к теплоемкости mc , то есть q/mc [°C/сек.]. Это отношение определяет скорость изменения температуры грунта. В качестве параметра

тра неравновесности, удобного для обработки экспериментальных данных, используется отношение времени изменения температуры на заданную величину в неравновесных и равновесных условиях:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (6)$$

где τ, τ_0 — время изменения температуры грунта на Δt , °С в неравновесных и равновесных условиях.

Экспериментальные данные, соответствующие кривым 3 и 4 на рис. 5 позволяют получить эмпирическую зависимость влажности мерзлого грунта в неравновесных условиях:

$$W(t, \tau) = W_{осм} + (1 - W_{осм}) \cdot W(t)^{n(\bar{\tau})}, \quad (7)$$

где $\bar{W}(t) = \frac{W_0(t) - W_{осм}}{1 - W_{осм}}$; $W_0(t)$ — зависимость влажности мерзлого грунта от тем-

пературы в равновесных условиях; $n(\bar{\tau}) = 1.0 + 0.27 \ln(\bar{\tau})$. Максимальная погрешность определения относительной влажности грунта по зависимости (7) в рассмотренных условиях не превышает 0,05.

Выводы

Создана и использована в экспериментальных исследованиях установка, позволяющая изучать калориметрическим методом процессы промерзания-оттаивания влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях.

Получены экспериментальные данные о неравновесном процессе промерзания глинистого грунта при различной интенсивности параметров теплопереноса.

Проведено аналитическое описание промерзания исследованного грунта, позволяющее определить содержание незамерзшей воды с учетом неравновесности системы грунт-лед-вода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старостин Е.Г. Фазовое равновесие воды в горных породах при отрицательных температурах: дисс. ... д-ра техн. наук. Якутск, 2009. 365 с.
2. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
3. Горелик Я.Б., Колунин В.С. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере. Новосибирск: СО РАН, 2002. 317 с.
4. Саркисян Р.М. Руководство по определению физических теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. М.: Изд-во ПНИИИС Госстроя СССР, 1973. 191 с.
5. Григорьева В.Г. // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М.: Академия наук СССР, 1957. Сб. 3. 177-193 с.
6. Даниэлян Ю.С. Исследования неравновесного теплопереноса в грунтах с фазовыми переходами влаги применительно к проектированию обустройства нефтяных месторождений: Дисс. ... д-ра ф.-м. наук. Тюмень, 1997. 368 с.
7. Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Недра, 1990. 559 с.
8. Кислицын А.А. Основы теплофизики. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2002. 152 с.