

УДК: 536:551.343.74

*Б.В. Григорьев*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ В РАВНОВЕСНЫХ И НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ**

*B.V. Grigoriev*

### **EXPERIMENTAL STUDY OF FREEZING OF SANDY GROUND IN EQUILIBRIUM AND DISEQUILIBRIUM CONDITIONS**

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. НЕЗАМЕРЗШАЯ ВОДА. МЕРЗЛЫЙ ГРУНТ. НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ.

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.

THE EXPERIMENTAL SYSTEM. UNFROZEN WATER. FROZEN GROUND. NON-EQUILIBRIUM PROCESSES.

Особенности, с которыми приходится сталкиваться при проектировании и реализации проектов железнодорожных и автомобильных дорог, продуктопроводов, промышленных и жилых сооружений на территориях вечной мерзлоты или подвергающихся сезонному промерзанию — оттаиванию (а это сопровождается, в первую очередь, пучинистостью при промерзании и просадкой в результате оттаивания мерзлого грунта, скачкообразным изменением прочностных и реологических свойств грунта, существенным изменением теплофизических параметров — теплоемкости, теплопроводности, связанных с кристаллизацией/таянием поровой воды), требуют от разработчика представления всей картины процессов и преобразований, происходящих в грунте при его замерзании и оттаивании.

Характерной чертой влажных грунтов является неполное замерзание поровой воды при 0 °С. Данный факт был установлен G.J. Youncous (1920) [1]. Согласно его исследованиям некоторое количество воды в грунте остается незамерзшим вплоть до температуры –78 °С. Внедрение калориметрического метода З.А. Нерсесовой [2] позволило получить кривые содержания неза-

мерзшей воды в зависимости от отрицательной температуры для различных видов грунтов. При этом было установлено, что каждому типу грунта соответствует своя характерная кривая.

Необходимо добавить, что теплофизические и, особенно, прочностные и реологические свойства грунта в области отрицательных температур также не остаются постоянными, изменяясь с изменением температуры.

Несмотря на первоначально кажущуюся причину существования незамерзшей воды — соли, растворенные в поровой воде, этот факт не является решающим. Фактическое содержание незамерзшей воды для какой-либо отрицательной температуры оказывается в 5–10 раз выше, чем вычисленное по формулам для засоленного раствора [3]. Основные факторы — дисперсность грунта и, как следствие, величина активной удельной поверхности минеральных частиц  $S_{уд}$ . Более дисперсные грунты имеют большую поверхность минеральных частиц и, следовательно, обладают большей способностью связывать воду, содержащуюся в порах. Поэтому в глине и суглинке количество воды в незамерзшем состоянии всегда больше, чем

в песке, при одной и той же температуре. Тем не менее при анализе системы лед — вода с высокой концентрацией растворенных солей следует учитывать влияние солености на содержание незамерзшей воды.

Важная особенность процесса заморозания влажного грунта: при замораживании система лед — вода в грунте находится в состоянии термодинамического равновесия лишь при условии, что интенсивность отвода тепла ниже максимально допустимого для данного типа грунта. В случае превышения этой величины соотношение фаз в системе лед — вода нестабильно, содержание незамерзшей воды превышает значение, полученное при равновесных условиях для той же температуры [4].

Для исследования процессов заморозания — оттаивания в разных типах грунтов разработана экспериментальная установка [5], предназначенная для определения количества незамерзшей воды калориметрическим методом. Общая схема установки представлена на рис. 1.

Эксперимент проводится следующим образом. Бюкс заполняют исследуемым грунтом под некоторым усилием для устранения воздушных прослоек и пустот, после чего закрывают крышкой и вставляют термометр сопротивления по центру бюкса. 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.

Калориметр заполняют водой и калориметрической жидкостью. Важно, чтобы температура калориметрической жидкости перед началом эксперимента была выше температуры воды в оболочке на 1–2 °С. За 15–20 минут до окончания замораживания 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 — «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 составляет 20–25 мин. «Конечный» период — измерение температуры в течение 10–15 минут после окончания главного периода.

На основании данных калориметрического опыта вычисляют содержание льда в образце при данной отрицательной температуре по следующей

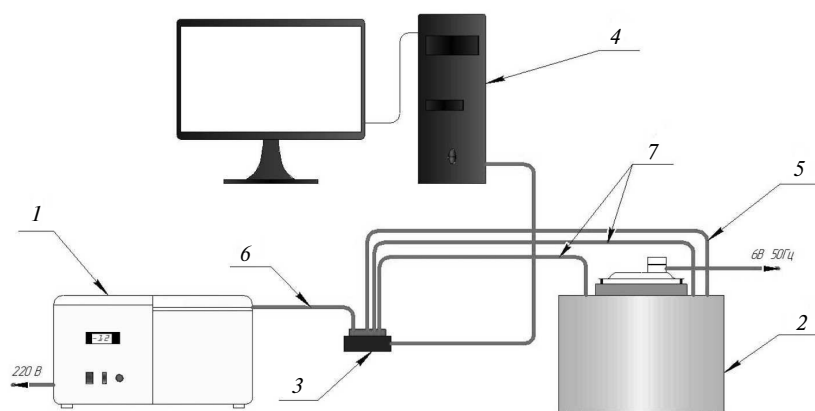


Рис. 1. Экспериментальная установка: термостат 1; калориметр 2; платиновые термометры сопротивления 6, 8, 5; аналогово-цифровой преобразователь 3; компьютер 4; бюксы для грунта; три стакана различного диаметра; весы электронные

формуле, вытекающей из уравнения теплового баланса:

$$m_{л} = \frac{K(\vartheta_0 - \vartheta'_n) - |T_{г1} - T_{г2}|(c_{г}m_{г} + c_{в}m_{в\text{исх}} + c_{б}m_{б})}{Q_{ф} - |T_{г1}|(c_{в} - c_{л})}, \quad (1)$$

где  $K$  [кДж/К] — тепловой параметр калориметра, определяемый в ходе дополнительного эксперимента;  $c_{г}$ ,  $c_{в}$ ,  $c_{л}$ ,  $c_{б}$  [кДж/кгК] — теплоемкость соответственно сухого грунта, воды, льда и материала бюкса;  $m_{г}$ ,  $m_{в\text{исх}}$ ,  $m_{л}$ ,  $m_{б}$ , кг — массы грунта, воды (исходная), льда и бюкса;  $Q_{ф}$  [кДж/кг] — теплота фазового перехода;  $|T_{г1} - T_{г2}|$ ;  $(\vartheta_0 - \vartheta'_n)$  — изменение температуры образца и калориметрической жидкости в ходе эксперимента;  $\vartheta'_n$  — температура последнего отсчета главного периода с учетом поправки на теплообмен, найденной по формуле Реньо — Пфаундлера — Усова [6].

Вес  $m_{н}$  незамерзшей воды при заданной отрицательной температуре находят по разности

$$m_{н} = m_{в\text{исх}} - m_{л}. \quad (2)$$

В серии экспериментов в качестве исследуемого грунта был использован мелкодисперсный влажный песок массой 109,116 г, масса воды в грунте составила 20,504 г, масса сухого образца — 88,612 г.

В ходе проводимых экспериментов грунт замораживался до различных температур в интервале  $-(0,5-11)^\circ\text{C}$ ; каждый раз замораживание длилось 1 час, после чего проводили калориметрический опыт.

В результате получен ряд значений массы незамерзшей воды, соответствующий величинам отрицательной температуры (рис. 2).

Было установлено, что большая часть воды (70 % от начальной массы) замерзла в узком интервале температур, от 0 до  $-0,5^\circ\text{C}$ . Это объясняется, в первую очередь, малой по сравнению, например, с глиной величиной удельной активной поверхности минеральных частиц, благодаря чему большая часть поровой воды — свободная и застывает вблизи нуля (рис. 2).

Та часть воды, что оказалась связанной частицами грунта, замерзает в интервале от  $-0,5$  до  $-3^\circ\text{C}$ , после чего, видимо, остается лишь прочносвязанная и высокоминерализованная вода, образовавшаяся в результате отжатия солей при замерзании свободной и связанной воды.

Дополнительно, чтобы исключить вероятность влияния солености на содержание незамерзшей воды, на жидкостном ионном хроматографе было определено содержание основных ионов водорастворимых солей в песке. Получены следующие результаты, г/л:

Хлорид (Cl) .....	0,114
Сульфат ( $\text{SO}_4$ ) .....	0,025
Гидрокарбонат ( $\text{HCO}_3$ ) .....	0,318
Натрий (Na) .....	0,095
Калий (K) .....	0,044
Магний (Mg) .....	0,018
Кальций (Ca) .....	0,074
Суммарная минерализация .....	0,687

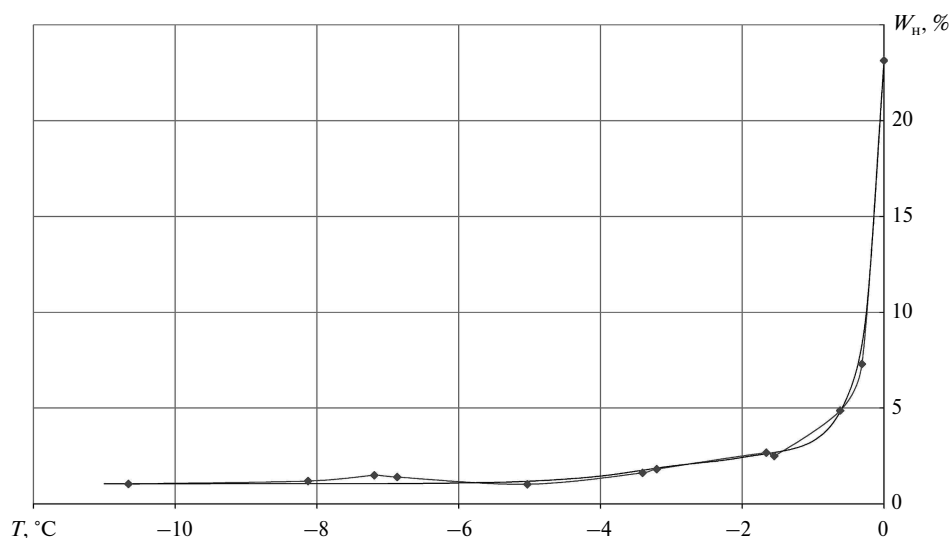


Рис. 2. Экспериментальная (—•—) и аппроксимационная (—) кривые зависимости содержания незамерзшей воды от температуры

Данные говорят о низкой минерализации поровой воды. Очевидно, что такая концентрация солей не способна заметно повлиять на характер кривой рис. 2.

Чтобы установить степень влияния интенсивности замораживания на содержание незамерзшей воды для данного типа грунта, были проведены пять серий экспериментов по замораживанию с различной интенсивностью теплоотвода. В результате получены 5 кривых содержания незамерзшей воды, для случаев когда замораживание длилось 3 часа, 1 час, 35 минут, 25 мин и 16 минут (рис. 3).

Видно, что экспериментальные точки трех кривых (3 часа; 1 час; 35 минут) практически совпадают, т. е. любая из этих трех кривых является равновесной (система лед — незамерзшая вода находится в устойчивом термодинамическом равновесии). В то же время, как следует из рис. 3, при замораживании в течение 16 и 25 минут наблюдается ярко выраженное отклонение системы от равновесного состояния. При этом чем ниже конечная температура замораживания, тем меньше отклонение от равновесия. Очевидно, что, продолжая проводить эксперимент для кривой «16 мин», например при  $T = -11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , полученное значение  $W_n$  не отличалось бы от равновесного ее содержания при этой температуре. Такой характер

кривой, по мнению автора, объясним следующим образом: при быстром отводе тепла от системы грунт—вода часть свободной воды не кристаллизуется, превращаясь в аморфную структуру. При высоких отрицательных температурах силы взаимодействия между молекулами воды не успевают сгруппировать их в тетраэдры (что обусловлено в первую очередь высокой интенсивностью теплоотвода в короткий промежуток времени и высокой температурой  $T$ ), однако при более низких температурах, как указано в статье [7], силы взаимодействия значительно возрастают, и, следовательно, больше молекул воды группируется в тетраэдры с высвобождением скрытой теплоты кристаллизации, т. е. межмолекулярные силы в воде при низкой отрицательной температуре преобладают над дезориентационным эффектом при такой интенсивности замораживания.

Аппроксимация по разработанной автором методике равновесной кривой, в качестве которой выбрана кривая «1 час» (хотя можно взять любую из трех), выражена следующей зависимостью (рис. 2):

$$W(T) = e^{\frac{t}{10} f(t)} (W_{исх} - W_{ост}) + W_{ост}, \quad (3)$$

где  $W_{ост}$  — влажность грунта при  $t = -10,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $W(t)$  — искомое значение влажности при температуре  $t, ^{\circ}\text{C}$ ;

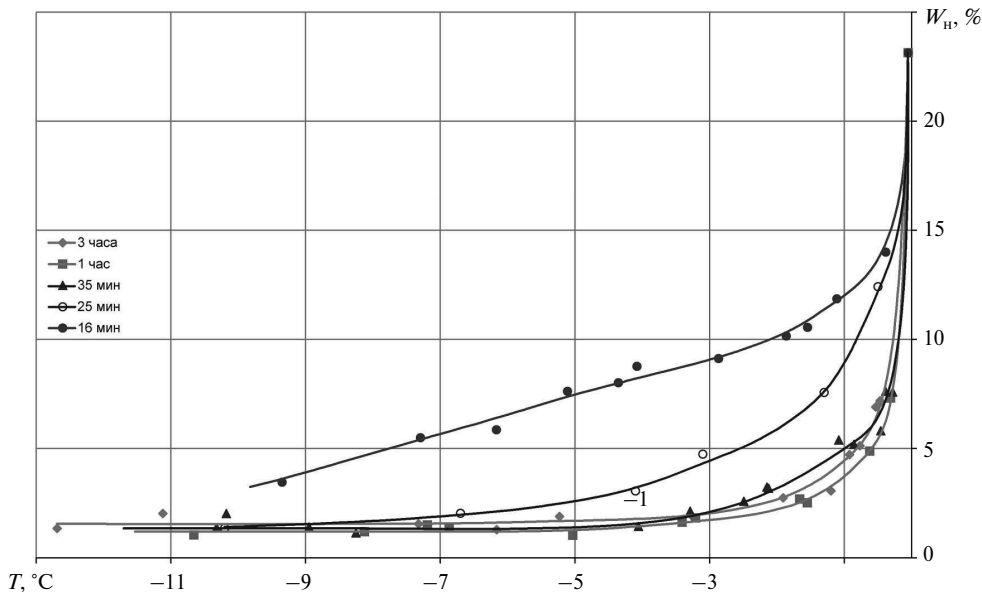


Рис. 3. Экспериментальные зависимости содержания незамерзшей воды в грунте для разных длительностей замораживания:  
 ◆ — 3 часа; ■ — 1 час; ▲ — 35 мин; ○ — 25 мин; ● — 16 мин

$$f(t) = 0,10t^3 + 2,14t^2 + 14,57t + 38,65. \quad (4)$$

Различие между экспериментальными данными (см. рис. 2) и значениями влажности, полученными по формуле [6], не превышает 2 %.

Для семейства неравновесных кривых на рис. 3 эмпирическая зависимость влажности мерзлого грунта аппроксимируется следующей формулой:

$$W(t, \tau) = W_{\text{ост}} + (1 - W_{\text{ост}}) \overline{W}(t)^{n(\bar{\tau})}, \quad (5)$$

где  $\overline{W}(t) = \frac{W_0(t) - W_{\text{ост}}}{1 - W_{\text{ост}}}$ ;  $W_0(t)$  — зависимость влажности мерзлого грунта от температуры в равновесных условиях;  $n(\bar{\tau}) = 0,88\bar{\tau} + 0,12$ ;

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

$\tau, \tau_0$  — время изменения температуры грунта на  $\Delta t, ^\circ\text{C}$ , в неравновесных и равновесных условиях.

Максимальная погрешность определения относительной влажности грунта по зависимо-

сти (5) в рассмотренных условиях не превышает 6 %.

Создана экспериментальная установка, позволяющая изучать калориметрическим методом процессы промерзания — оттаивания влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях.

Экспериментально доказано, что большая часть поровой воды в песке — 70 %, замерзает в узком температурном интервале — от 0 до  $-0,5^\circ\text{C}$ .

Получены экспериментальные данные о неравновесном процессе промерзания песка при различной интенсивности параметров теплопереноса. Влияние интенсивности отвода тепла на содержание незамерзшей воды наиболее выражено в области высоких отрицательных температур и убывает с уменьшением последних.

В рамках проведенных исследований установлено, что минимальное время, достаточное для равновесного замораживания песчаного грунта составляет 35 мин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **P. Newman, Greg.** Heat and mass transfer in unsaturated soil during freezing [Текст]: A Thesis Submitted to the faculty of graduate studies and research in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the department of Civil Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Canada / Greg P. Newman. — 1995. — 246 pages.
2. **Цытович, Н.А.** Механика мерзлых грунтов [Текст] / Н.А. Цытович. — М.: Высшая школа, 1973. — 448 с.
3. **Горелик, Я.Б.** Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере [Текст] / Я.Б. Горелик, В.С. Колунин. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. — 317 с.
4. **Даниэлян, Ю.С.** Исследования неравновесного теплопереноса в грунтах с фазовыми переходами влаги применительно к проектированию обустройства нефтяных месторождений [Текст]: Дисс. ... д. ф-м. наук / Ю.С. Даниэлян. — 01.04.14 Тюмень, 1997. — 368 с.
5. **Григорьев, Б.В.** Экспериментальное исследование промерзания-оттаивания грунтов в неравновесных условиях [Текст] / Б.В. Григорьев, А.Б. Шабаров // Вестник Тюменского государственного университета. — Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2012. — С. 53–60.
6. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов [Текст] / Произв. и науч.-исслед. ин-т по инж. изысканиям в стр-ве Госстроя ССР. Науч.-исслед. ин-т оснований и подземных сооружений Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1973. — 191 с.
7. **Ананян, А.А.** Природа воды в тонкодисперсных горных породах и особенности ее кристаллизации [Текст] / А.А. Ананян // 2-я Междунар. конф. по мерзлотоведению (Якутск). Доклады и сообщения. Вып. 4: Физика, физико-химия и механика мерзлых горных пород и льда / Акад. наук СССР. — Якутск: Якутское книжное изд-во, 1973. — С. 111–116.
8. **Вакулин, А.А.** Основы геокриологии [Текст] / А.А. Вакулин. — Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2011. — 220 с.

**ГРИГОРЬЕВ Борис Владимирович** — научный сотрудник Тюменского государственного университета.

625003, ул. Семакова, 10, г. Тюмень, Россия  
(3452) 46-40-61  
Raskatov\_@mail.ru