

© 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.

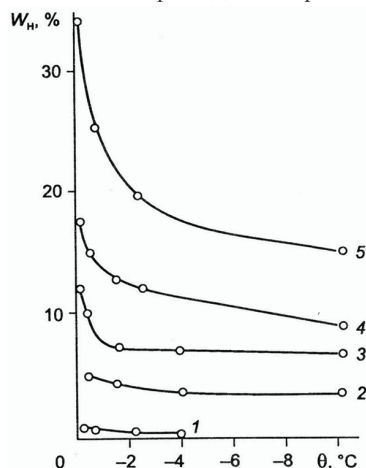


Рис. 1. Кривые содержания незамерзшей воды в зависимости от величины отрицательной температуры [2]:  
1-кварцевый песок; 2-супесь; 3-суглинок;  
4-глина; 5-глина содержащая монтмориллонит

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.

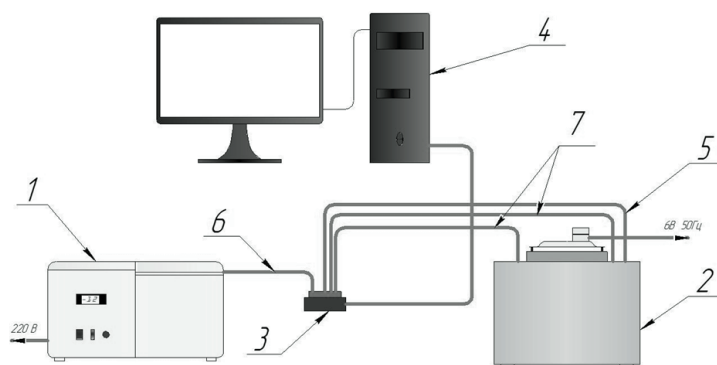


Рис. 2. Экспериментальная установка

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

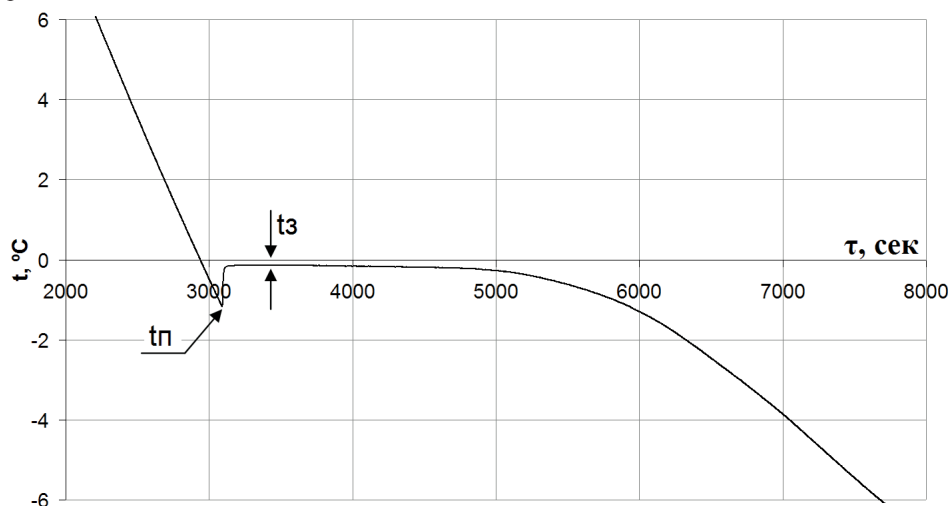


Рис. 3. Характерная кривая изменения температуры образца в процессе охлаждения

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;  $\Theta_0$  — средняя температура начального периода (сумма первого и последнего отсчетов, деленная на 2);  $\Theta_n$  — то же для конечного периода;  $\vartheta_0$  — последний отсчет начального периода;  $\vartheta_n$  — последний отсчет главного периода (температура равновесия);  $\sum_1^{n-1} \vartheta$  — сумма температур калориметра всех отсчетов главного периода, за исключением последнего отсчета ( $\vartheta_n$ ).

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,  $c_{\Gamma}$ ,  $c_{\text{в}}$ ,  $c_{\text{л}}$ ,  $c_{\text{б}}$  [кДж/кгК] — соответственно теплоемкость сухого грунта, воды, льда и материала бюкса;  $m_{\Gamma}$ ,  $m_{\text{в}}$ ,  $m_{\text{л}}$ ,  $m_{\text{б}}$  [кг] — масса грунта, воды исходная, льда и бюкса;  $Q_{\phi}$  [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];  $\tau$  — 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  $-0,5^{\circ}\text{C}$  —  $-13^{\circ}\text{C}$ . 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
$m_{н}, \text{кг}$	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 —  $-3^\circ\text{C}$ . Далее наблюдается плавное уменьшение содержания жидкой фазы стремящейся к постоянной величине, равной количеству прочносвязанной воды [5].

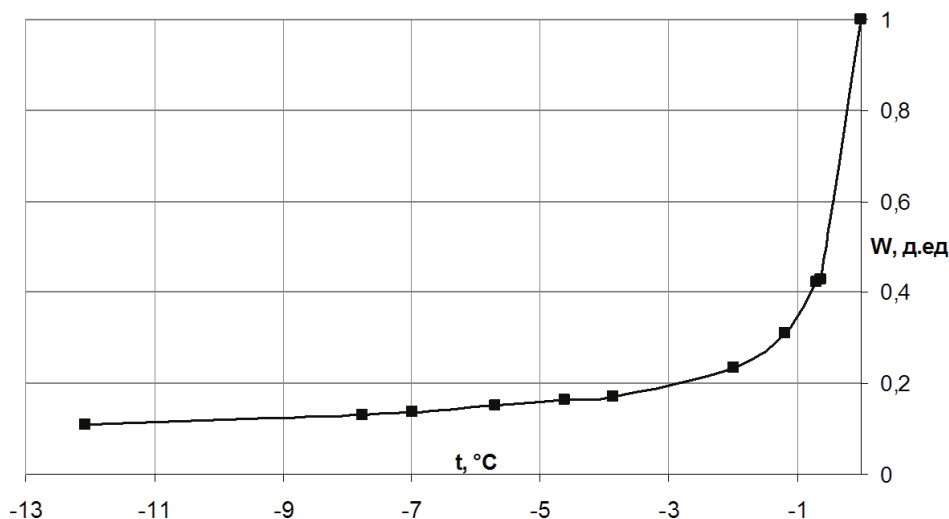


Рис. 4. Зависимость изменения содержания незамерзшей воды в грунте от температуры

Следует отметить, что точка ( $t_{г1}=0^\circ\text{C}$ ,  $W=1$ ) получена из начальных данных и условия что при  $0^\circ\text{C}$  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).

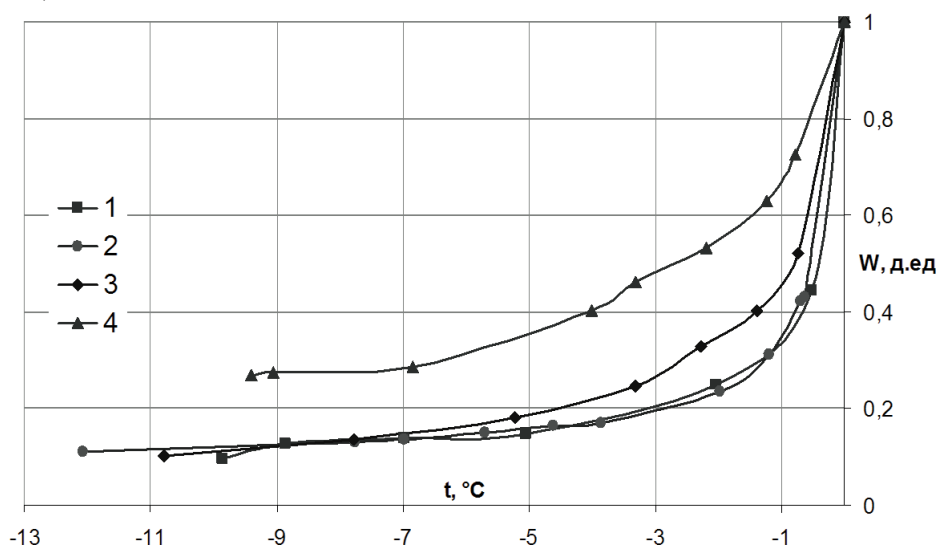


Рис. 5. Кривые зависимости незамерзшей воды от температуры при различном времени замораживания.

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 замораживания 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  $\tau, \tau_0$  — время изменения температуры грунта на  $\Delta t$ , °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.