

УДК 637.52.001.8

Моделирование процесса оттаивания грунта на базе экспериментальных данных

Канд. техн. наук А. Г. БЕЛОЗЁРОВ¹, д-р техн. наук Е. В. СЕМЕНОВ²,
канд. техн. наук С. Б. БАБАКИН³

¹ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН

² Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (ПКУ)

³ Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности —
филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН

E-mail: holod@mgupp.ru

В статье, на основе решения в модифицированной форме задачи Стефана о фазовом переходе в моделирующем объеме грунтового слоя телом в виде полупространства, обосновывается предложенный авторами алгоритм расчета распределения температуры по времени и глубине грунта. Для поставленной задачи, в качестве исходных данных по этим показателям, применялись накопленные в летний период времени 2011 г. измеренные значения температуры в определенном месте полуострова Таймыр. При этом, начиная с 01 июня месяца в 0 часов (по местному времени), через каждые десять дней данного периода, в работе пользовались показателями температуры воздуха на поверхности грунта и на его глубине в 0,6 и 0,9 м. На основе разработанного алгоритма проводилось численное моделирование, количественный и качественный анализ стратификации температуры по времени и по глубине грунта. Предложенный базирующийся на современных информационных технологиях метод расчета целесообразно использовать для практического применения.

Ключевые слова: моделирование, лед, влагосодержание, теплоперенос, фазовый переход, плавление, оттаивание.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 07.09.2020, принята к печати 10.02.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-73-78

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Белозёров А. Г., Семенов Е. В., Бабакин С. Б. Моделирование процесса оттаивания грунта на базе экспериментальных данных // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2. С. 73–78.

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-73-78

Experimental modelling of soil thawing

Ph. D. A. G. BELOZEROV¹, D. Sc. E. V. SEMENOV², Ph. D. S. B. BABAKIN³

¹V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems, Russian Academy of Sciences

²K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management

³All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V. M. Gorbатов

E-mail: holod@mgupp.ru

Based on the modified solution of Stefan task for phase transition in a soil prototype in the form of half-space, an algorithm of calculating temperature distribution over time and soil depth, proposed by the authors, is substantiated. The data on the temperature at a particular location of the Taymyr Peninsula taken in summer 2011 are used for the purpose. Starting from 0 a. m. (local time) on July, 1st, every ten days of the period under consideration the temperature values for the soil surface and the soli at the depth of 0.6 and 0.9 m were taken for the analysis. Numerical modelling as well as quantity and quality analysis for temperature stratification over time and soli depth have been made on the basis of the algorithm developed. The proposed calculation technique, based on modern information technologies, is of great practical perspective.

Keywords: modelling, ice, moisture content, heat transfer, phase transfer, melting, thawing.

Article info:

Received 07/09/2020, accepted 10/02/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-73-78

Article in Russian

For citation:

Belozerov A. G., Semenov E. V., Babakin S. B. Experimental modelling of soil thawing. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 2. p. 73–78. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-73-78

Введение

Поскольку примерно две трети территории России занято вечной мерзлотой, а оставшаяся часть ее площади в той или иной степени подвержена сезонному промерзанию и оттаиванию грунтов, то учет данного теплового фактора является одним из важнейших при обосновании условий нормального функционирования инфраструктуры, комфортного проживания и трудовой деятельности человеческого социума на этой территории. Известно также, что вся многовековая связанная с проблемами освоения человеческой популяцией и его креативной деятельности на высоких широтах базируется на эффективном учете в вопросе возведения строений водной компоненты грунта, а именно, ее твердотельного состояния — льда. Что, в первую очередь, обуславливает конструктивные особенности и глубины заложения фундаментов строений различного назначения, подземных сооружений, транспортных коммуникаций и другого в Северных и Северо-Восточных регионах нашей страны.

Наблюдаемый в последние годы ускоренный темп потепления климата, особенно в северных широтах Земли, приводит сезонно-промерзающие водонасыщенные грунты к их промерзанию и вспучиванию. Это природное явление инициирует в жилищных и промышленных объектах значительные деформации, приводящие к разрушению объектов, провоцирует техногенные катастрофы, с исключительно вредным воздействием этого фактора на природу в высокоширотных регионах Российской Федерации.

В результате, с учетом климатических условий, для поддержания жилищной инфраструктуры и промышленных объектов в пригодном для эксплуатации состоянии и проводимом ремонте государство вынуждено расходовать значительные трудовые и материальные ресурсы.

Особенности кинетики процессов замерзания и оттаивания грунтов с использованием современных средств информационного моделирования, с разных позиций, освещались в работах [1]–[10]. При этом используются основанный на базе данных космических аппаратов метод оценки градиентов влажности в поверхностном слое грунта [1], волоконно-оптические датчики для мониторинга температур в сопровождающихся эффектами массо- и теплопереноса процессах оттаивания и замораживания пористых сред, позволяющие регистрировать температурно-деформационные особенности фазового перехода в пористой среде [2].

В опытах на экспериментальной установке по изучению процесса промерзания грунтов в системе грунт-вода-лед в условиях содержания в системе незамерзшей воды [2], аналогичная проблема с детальным экспериментальным исследованием поведения системы вода-тепло-пар в замерзающей крупнозернистой почве ставилась и изучалась в работе [3]. Статья [4] посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию морозного пучения в лабораторных образцах из влагонасыщенного песка. Характеризующийся наиболее холодным температурным режимом мерзлотных почв на южном пределе криолитозоны европейского Северо-Востока России исследовался в работе [5].

Обоснование методики численного моделирования и исследование зависимости влажности в промерзающих

грунтах от скорости промерзания дано в статье [6], где приведена оценка влияния влажности грунтов на значенные прочностных характеристик в процессе оттаивания.

В работах [7], [8] исследованы различные аспекты влияния повторяющихся циклов замораживания и оттаивания почв, их высушивания и увлажнения, содержания в них необходимых для плодородия компонентов, с точки зрения зависимости урожайности почвы от этих факторов. На базе полученных опытных наблюдений в различных точках регионов РФ и Белоруссии и статистической обработки наблюдений рекомендована выполняющаяся с хорошей точностью регрессионная зависимость по прогнозированию глубины оттаивания грунта [9].

Резюмируя результаты проведенного литературного обзора, можно заключить, что в настоящее время, связанные с предметом, статьи, имеющие научно-техническое и народно-хозяйственное значение задачи, отражены в достаточно представительном списке публикаций.

Однако, среди большого числа, постоянно возникающих перед учеными и инженерно-техническими работниками Севера проблемами, имеется много не исследованных, но крайне важных требующих оперативного решения задач.

Так, важной проблемой является круглогодичного оперативного мониторинга температурных показателей по глубине грунта в разных географических точках северных и северо-восточных районов России. Подобный опыт в течение одного сезона в 2010–2011 гг. проводился в районе Таймыр, где в климатических условиях, по двум часам суток, на поверхности грунта и его глубинах в 60 и 90 см осуществлялось измерение температуры этой субстанции.

Причем известно, что в условиях нулевых и более низких температур количественный анализ процесса передачи тепла в промерзающем влагонасыщенном грунте осложняется фазовым переходом воды в лед, приводящим к скачку градиента температуры в грунте и поэтому затрудняет постановку и количественное моделирование, с использованием полученных опытных данных, процесса теплопередачи.

Ниже, исходя из предложенной физико-математической модели, проводится аналитическое и численное исследование явления теплопередачи в грунте полуострова Таймыр на базе данных по замеру температуры в фиксированные дни летнего сезона (рис. 1).

Постановка задачи

По визуальному анализу установленных опытным путем числовых данных рис. 1 и табл. 1 на поверхности грунта и фиксированной глубине его в 60 и 90 см следует, что за период июнь-июль месяц температура воздуха на поверхности грунта в фиксированные дни колеблется от 3 до 18 °С. Причем за это время температура грунта на глубине в 60 см монотонно возрастает от –6,5 до –1,5 °С, а на глубине 90 см — от –7,5 до –2,5 °С. Тем самым можно заключить, что после зимне-весеннего сезона в летний период времени погодные условия допускают оттаивание грунта: с физической точки зрения — проявлению эффекта фазового перехода льдокомпонентов грунта в водную компоненту его.

При этом, в основу количественного анализа этого процесса полагается отнесенное к плоскости xOy с направленной вертикально вниз по глубине грунта осью x одномерное дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности

Теоретически, проблему передачи теплоты в теле от жидкой фазы к твердой во многих случаях трактуют как задачу Ламе — Стефана о фазовом переходе субстанции на границе фронта заморозания, когда процесс теплопередачи от зоны I талого грунта развивается к замороженной зоне II (рис. 2).

Тогда математическая задача о моделировании кинетики процесса оттаивания грунта может быть сформулирована следующим образом: требуется найти температуру $t_1(x, \tau)$ и $t_2(x, \tau)$ как удовлетворяющие уравнению теплопроводности Фурье функции, соответственно, в областях I, II (рис. 2):

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \omega(\tau); \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2}, \quad \omega(\tau) < x < \infty, \quad (2)$$

где τ — время; x — вертикальная координата; a_1, a_2 — коэффициент температуропроводности воды и льда в областях I, II, соответственно.

$$\xi = \omega(\tau) \quad (3)$$

Выражение (3) — искомое уравнение фронта оттаивания грунта.

При этом, в качестве начальных условий для $t_1(x, \tau)$ и $t_2(x, \tau)$ областей I, II принимаем

$$t_1(x, 0) = f_0(x), \quad \text{при } 0 < x < \omega(\tau) \quad (4)$$

$$t_2(x, 0) = f_0(x), \quad \text{при } \omega(\tau) < x < \infty \quad (5)$$

где $f_0(x)$ — зависимости и данные опытных наблюдений температуры по дням (рис. 1), (табл. 1).

В качестве граничных условий для области I

$$t_1(0, \tau) = u_0, \quad (6)$$

$$t_1(\omega, \tau) = u_3, \quad (7)$$

где u_0, u_3 — соответственно, температура воздуха на поверхности грунта, $u_3 = \text{const}$ — криоскопическая температура (температура фазового перехода).

Для области II

$$t_2(\omega, \tau) = u_3, \quad (8)$$

$$\frac{\partial t_2(\infty, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

В принятых условиях по геометрии занимаемого грунтом пространства в качестве границы (фронта) оттаивания принимается перемещающаяся во времени разделяющая зоны I и II плоскость (рис. 2) $\xi = \omega(\tau)$ (3), на которой, в силу закона сохранения энергии, по высоте объема $x > 0$ выполняется условие теплового баланса Стефана.

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} (\lambda_1 t_1 - \lambda_2 t_2) \right]_{x=\omega(\tau)} = r \rho_1 m \frac{d\omega}{dt}, \quad (10)$$

где, соответственно, $\lambda_1, \lambda_2; t_1, t_2$ — коэффициент теплопроводности и температура зоны I (воды) и зоны II (льда), r —

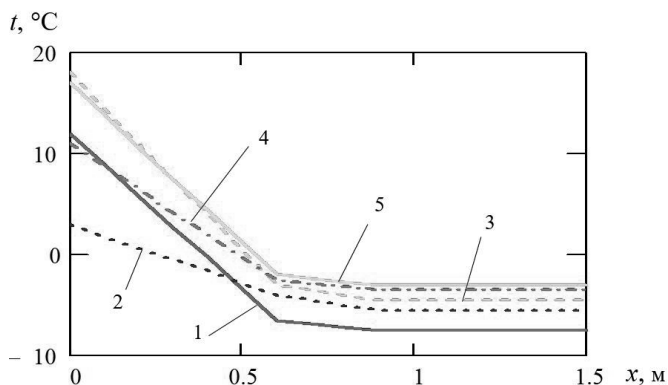


Рис. 1. Значение температуры на поверхности грунта и на глубине 0,6 и 0,9 м за определенный период 2011 г.: 1 — 01.06; 2 — 10.06; 3 — 20.06; 4 — 30.06; 5 — 10.07

Fig. 1. The values of the temperature on the soil surface and at the depth of 0.6 and 0.9 m for a particular period of 2011: 1 — 01.06; 2 — 10.06; 3 — 20.06; 4 — 30.06; 5 — 10.07

Таблица 1

Значение температуры грунта в летние месяцы 2011 г. на его поверхности и глубине 0,6 и 0,9 м

Table 1

The values of the temperature on the soil surface and at the depth of 0.6 and 0.9 m in summer 2011

Дата замера температуры	01.06	10.06	20.06	30.06	10.07	20.07
Температура поверхности, °C	12	3	18	11	17	9
На глубине 0,6 м, °C	-6,5	-4	-3	-2,5	-2	-1,5
На глубине 0,9 м, °C	-7,5	-5,5	-4,5	-3,5	-3	-2,5

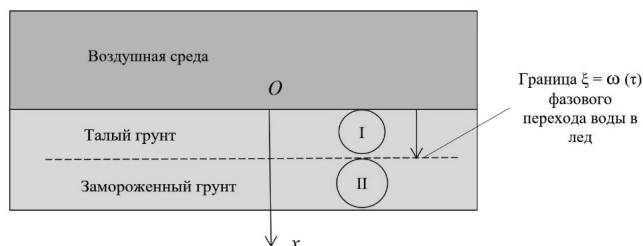


Рис. 2. Схема к расчету процесса оттаивания грунта

Fig. 2. Soil thawing calculation

удельная теплота плавления льда, ρ_1 — плотность воды, m — пористость (объемное влагосодержание) грунта.

Таким образом, на базе начальных условий (4), (5) и граничных условий (6)–(9), для дифференциальных уравнений (1), (2) сформулирована краевая задача по анализу кинетики процесса оттаивания грунта в полупространстве $x > 0$.

Решение задачи

Следуя Стефану, в качестве общего решения уравнения (1) может быть выбрано зависящее не от двух аргументов x и τ , а от одной, автомодельной, переменной ζ зависимость

$$t_1(x, \tau) = A + B \cdot \text{erf}(\zeta), \quad (11)$$

где A, B — подлежащие определению произвольные постоянные величины; $\operatorname{erf}(\zeta)$ — функция Крампа (интеграл ошибок),

$$\operatorname{erf}(\zeta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\zeta} \exp(-\zeta^2) d\zeta, \quad (12)$$

$$\zeta = x / (4a_1\tau)^{1/2}, \quad (13)$$

ζ — автомодельная переменная для зоны I.

Удовлетворяя, с использованием соотношений (11)–(13), граничным условиям (6), (7) для определения постоянных величин A, B , получим

$$A = u_0; \quad B = (u_3 - u_0) / \operatorname{erf}[\omega / (4a_1\tau)^{1/2}], \quad (14)$$

где в силу специфики принятого выражения (13) формула (14) возможна лишь в том случае, если принимается условие

$$\omega(\tau) = 2\sigma\tau^{1/2}, \quad (15)$$

σ — характеризующая интенсивность теплообмена величина (условно, параметр Стефана).

В таком случае коэффициент B рассчитывается по выражению

$$B = (u_3 - u_0) / \operatorname{erf}(\sigma/a_1^{1/2}), \quad (16)$$

Откуда заключаем, что частным решением задачи о передаче тепла в талом грунте (то есть, в области I) служит уравнение (11), с определяемыми по (14), (16) коэффициентами A и B .

В свою очередь, согласно выражениям (5), (8), (9), решением задачи о теплопроводности в замороженной части (в области II) является [10]

$$t_2(x, \tau) = t_0 + \frac{1}{2\sqrt{\pi a_2 \tau}} \int_{\omega}^{\infty} [f_0(\eta) - t_0] \left[\exp\left(-\frac{(x-\eta)^2}{4a_2\tau}\right) - \exp\left(-\frac{(x+\eta)^2}{4a_2\tau}\right) \right] d\eta, \quad (17)$$

где $f_0(x)$ задано по (5), ω — по (15), η — переменная интегрирования.

Формулы (11)–(17) полагаются в основу расчета стратификации температуры по времени τ и по глубине x грунта.

Имея в виду зависимость $d[\operatorname{erf}(x)]/dx = 2\pi^{-1/2}\exp(-x^2)$, на основе (11) и (17) определяются входящие в условие (10) Стефана производные

$$\partial t_1 / \partial x = B \exp[-x^2 / (4a_1\tau)] / (a_1\tau\pi)^{1/2}, \quad (18)$$

$$\partial t_2 / \partial x = F_1(x, \tau) - F_2(x, \tau), \quad (19)$$

где

$$F_1(x, \tau) = (\omega + x) \exp[-(\omega + x)^2 / (4a_2\tau)], \quad (20)$$

$$F_2(x, \tau) = (\omega - x) \exp[-(\omega - x)^2 / (4a_2\tau)], \quad (21)$$

ω определяется по (3).

И поэтому, с учетом формул (4), (7), (8), (10) приходим к характеристическому относительно параметра σ уравнению

$$F(x, \tau, \sigma) = \lambda_1 B a_1^{-1/2} \exp(-\sigma^2 / a_1) - \lambda_2 a_2^{-3/2} \tau^{-1} \int_{\omega}^{\infty} [f_0(\eta) - u_0] \times \\ \times [F_1(\eta) - F_2(\eta)] d\eta - \sqrt{\pi r} \cdot \rho_2 m \sigma = 0, \quad (22)$$

где F_1, F_2 определяются согласно (20), (21); σ — собственное значение поставленной краевой задачи.

На основе зависимостей (20)–(22) для водонасыщенного грунта в полупространстве $0 < x < \infty$ проводится количественное моделирование стратификации температуры по глубине x грунта и периоду τ времени процесса размораживания твердотельной фазы воды — льда.

Численный эксперимент

Количественное моделирование процесса оттаивания льда по зависимостям (20)–(22) осуществляли, используя процедуры среды Mathcad на базе следующих физико-механических и геометрических параметров процесса обработки.

Температура в начальный момент времени на поверхности грунта и по его глубине выбиралась в соответствии с данными табл. 1 и рис. 1, температура фазового перехода воды в лед $u_3 = -1$ °С; коэффициент теплопроводности для областей I и II $\lambda_1 = 2,39$; $\lambda_2 = 0,597$ Вт/(м·К); скрытая теплота фазового перехода воды в лед $r = 0,33 \cdot 10^6$ Дж/кг, плотность воды $\rho_1 = 1000$, льда — $\rho_2 = 910$ кг/м³. Пористость грунта варьировалась по значениям $m = [30; 50\%]$, время расчета $\tau = [1; 6$ ч].

Результаты расчета с первого по шестой час, отраженные графиками на рис. 2–4, выявляют соответствие расчетных данных по процессу передачи теплоты от воды ко льду физическому смыслу исследуемого явления. А именно, отмечается корреляционная зависимость между расчетными значениями параметра σ Стефана интенсивности процесса (рис. 3) и глубины талого грунта (рис. 4) с температурой внешней среды (воздуха на поверхности грунта) и исходной температуры грунта на разной глубине.

С одной стороны, снижение из-за выравнивания условий теплообмена по времени параметра σ (все кривые рис. 3), а также ухудшение условий размораживания грунта при сильном похолодании погоды (например, кривые 1, 2 ниже кривых 3, 4) и повышение интенсивности данного процесса во всех остальных случаях — когда температура внешней среды практически стабильна (все кривые рис. 4, начиная с пятого номера — по десятый).

С другой стороны, отраженный данными табл. 1 необычайный характер исходной температуры по глубине грунта и дням наблюдений, согласно расчету, также приводит к возрастанию глубины талого грунта (на рис. 4 все кривые, последовательно, по дням наблюдений располагаются одна над другой — глубина талого грунта возрастает).

При этом, в соответствии с формулой (3), координата фронта оттаивания грунта подчиняется возрастающей по времени параболической зависимости.

Отметим, что предложенный алгоритм, в рамках модели полупространства, может быть использован при количественном анализе задачи о расчете процесса оттаивания субстанции для тел канонической формы (цилиндра, шара). Например, при расчете процесса подготовки используемых в технологии безмашинного охлаждения на базе аккумуляторов холода, эвтектических плит немалой толщиной.

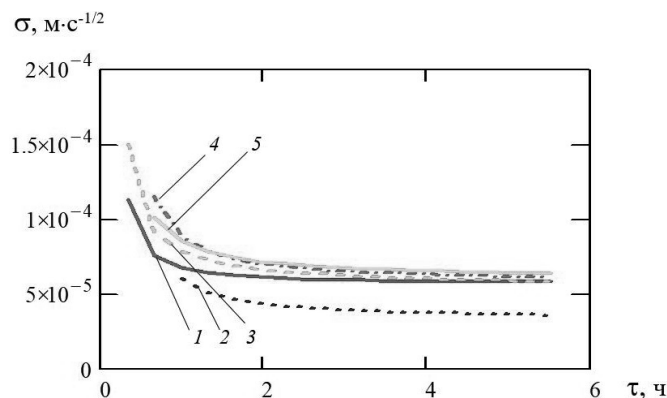


Рис. 3. Зависимости параметра σ фронта размораживания грунта по дням от времени наблюдений τ при пористости грунта $m=0,5$: 1 — 01.06; 2 — 10.06; 3 — 20.06; 4 — 30.06; 5 — 10.07, 2011 г.

Fig. 3. Daily dependencies of σ for soil thawing front on the time of observation τ at soil porousness of $m=0.5$: 1 — 01.06; 2 — 10.06; 3 — 20.06; 4 — 30.06; 5 — 10.07, 2011

Заключение

Таким образом, исходя из показанной адекватности результатов численного эксперимента с физическим смыслом процесса оттаивания грунта, установлена обоснованность применения для теоретического анализа данного процесса модели Стефана. Разработанный в статье алгоритм может быть применен при математическом моделировании процессов тепловой обработки объектов в смежных областях промышленности.

Литература

1. Яценко А. С., Бобров П. П. Исследование возможности определения градиента влажности в поверхностном слое почв по данным Smos и Gcom-w1 // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 8–3. С. 285–288.
2. Прохоров А. Е., Плехов О. А. Разработка системы мониторинга нестационарных температур и деформаций во влагонасыщенном грунте в условиях фазового перехода на базе оптоволоконных датчиков // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 1. С. 129–137.
3. Jianqiang Gao, Yuanming Lai Mingyi Zhang, Ziliang Feng. Experimental study on the water-heat-vapor behavior in a freezing coarse-grained soil // Applied Thermal Engineering. 128 (2018). P. 956–965.
4. Григорьев Б. В. Экспериментальное исследование промерзания песчаных грунтов в равновесных и неравновесных условиях // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 2 (171). С. 216–220.
5. Каверин Д. А., Пастухов А. В., Мажитова Г. Г. Особенности температурного режима холодных мерзлотных почв на южном пределе криолитозоны (Европейский Северо-Восток России) // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2014. Вып. 75. С. 48–61.
6. Кудрявцев С. А., Кажарский А. В. Численное моделирование процесса морозного пучения и оттаивания в зависимости от скорости промерзания грунтов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 105–110.

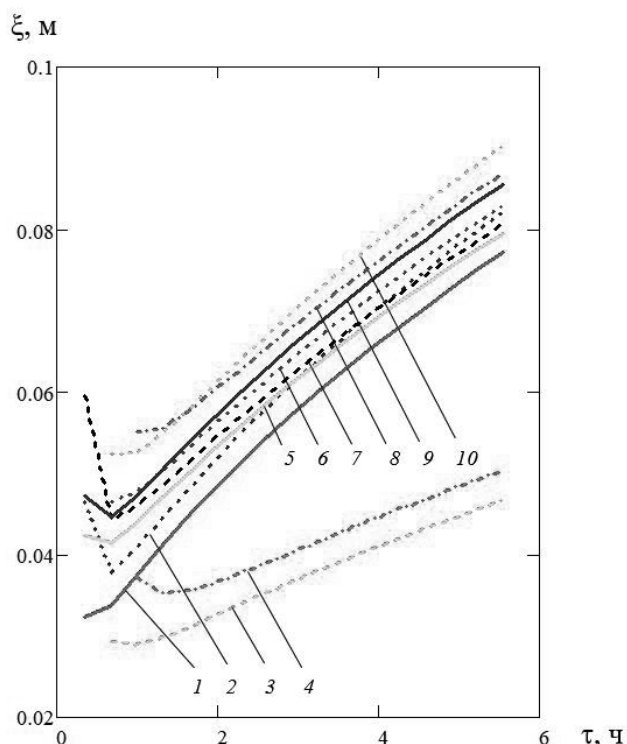


Рис. 4. Зависимости координаты ζ фронта размораживания грунта по дням от времени наблюдений τ и от пористости m ($m = 0,3$: 1,3,5,7,9; $m = 0,5$: 2,4,6,8,10; 1,2 — 01.06; 3,4 — 10.06; 5,6 — 20.06; 7,8 — 30.06; 9,10 — 10.07, 2011 г.)

Fig. 4. Daily dependencies of ζ for soil thawing front on the time of observation τ and soil porousness m ($m = 0.3$: 1,3,5,7,9; $m = 0.5$: 2,4,6,8,10; 1,2 — 01.06; 3,4 — 10.06; 5,6 — 20.06; 7,8 — 30.06; 9,10 — 10.07, 2011)

References

1. Yaschenko A. S., Bobrov P. P. Investigation of the possibility of determining the humidity gradient in the surface layer of soils according to Smos and Gcom-w1 data. *Izvestiya vuzov. Physics*. 2015. Vol. 58. No. 8–3. P. 285–288. (in Russian)
2. Prokhorov A. E., Plekhov O. A. Development of a monitoring system for non-stationary temperatures and deformations in moisture-saturated soil under phase transition conditions based on fiber-optic sensors. *Bulletin of the PNRPU. Mechanics*. 2019. No. 1. P. 129–137. (in Russian)
3. Jianqiang Gao, Yuanming Lai Mingyi Zhang, Ziliang Feng. Experimental study on the water-heat-vapor behavior in a freezing coarse-grained soil. *Applied Thermal Engineering*. 128 (2018). P. 956–965.
4. Grigoriev B. V. Experimental investigation of the freezing of sandy soils in equilibrium and nonequilibrium conditions. *Scientific and Technical vedomosti of the Saint-Petersburg State Polytechnic University*. 2013. No. 2 (171). pp. 216–220. (in Russian)
5. Kaverin D. A., Pastukhov A. V., Mazhitova G. G. Features of the temperature regime of cold permafrost soils at the southern limit of the cryolithozone (European North-East of Russia). *Bulletin of the V. V. Dokuchaev Soil Institute*. 2014. Vol. 75. P. 48–61. (in Russian)
6. Kudryavtsev S. A., Kazharsky A. V. Numerical modeling of the process of frost heaving and thawing depending on the speed of soil freezing. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2012. No. 2 (34). pp. 105–110. (in Russian)

7. Семенов В. М., Когут Б. М., Лукин С. М. Влияние повторяющихся циклов высушивания-увлажнения-замораживания-оттаивания на активный пул органического вещества почвы // Почвоведение. 2004. № 4. С. 443–454.
8. Сапронов Д. В., Крамарева Т. Н., Сапрыкина Ж. С. Влияние процессов промерзания-оттаивания на выделение углекислого газа из почвы и растительных материалов // Вестник ВГУ. Серия: Химия, биология, фармация. 2014. № 3. С. 79–85.
9. Маслов Б. С. Прогноз глубины оттаивания осушенной пахотной торфяной почвы // Почвоведение. 2007. № 12. С. 1489–1491.
10. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
11. Вечная мерзлота на страже качества продуктов (От экспедиции Эдуарда Толля в будущее). История, результаты и перспективы уникального эксперимента по длительному хранению пищевых продуктов в условиях вечной мерзлоты / Под общей редакцией А. Б. Лисицына, Д. Ю. Гогина; составители: Д. И. Шпаро, А. А. Семенова, А. Н. Рогова. М.: Эдиториал сервис, 2011. 222 с.
7. Semenov V. M., Kogut B. M., Lukin S. M. Influence of repeated drying-wetting-freezing-thawing cycles on the active pool of soil organic matter. *Soil science*. 2004. No. 4. pp. 443–454. (in Russian)
8. Sapronov D. V., Kramareva T. N., Saprykina Zh. S. Influence of freezing-thawing processes on the release of carbon dioxide from soil and plant materials. *Bulletin of the VSU. Series: Chemistry, Biology, pharmacy*. 2014. No. 3. pp. 79–85. (in Russian)
9. Maslov B. S. Forecast of thawing depth of drained arable peat soil. *Soil science*. 2007. No. 12. pp. 1489–1491. (in Russian)
10. Lykov A. V. The theory of heat conduction. Moscow: Higher School, 1967. 600 p. (in Russian)
11. Permafrost on the guard of the quality of products (From the expedition of Eduard Toll to the future). History, results and prospects of a unique experiment on long-term storage of food products in permafrost conditions / Under the general editorship of A. B. Lisitsyn, D. Y. Gogin; compiled by D. I. Shparo, A. A. Semenova, A. N. Rogova. Moscow: Editorial Service, 2011. 222 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Белозеров Антон Георгиевич

К. т. н., заместитель директора по работе с филиалами ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 109316, Москва, ул. Талалихина, 26, a.belozеров@fncps.ru

Семенов Евгений Владимирович

Д. т. н., профессор кафедры технологии продуктов из растительного сырья и парфюмерно-косметических изделий Московского государственного университета технологий и управления им. К. Г. Разумовского, Россия, Москва, ул. Земляной Вал, 73, sem-post@mail.ru

Бабакин Сергей Борисович

К. т. н., Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности (ВНИХИ) — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 127422, г. Москва, ул. Костякова, д. 12, holod@mgupp.ru

Information about authors

Belozеров Anton G.

Ph. D., Deputy Director for work with branches of Federal State Budgetary Scientific Institution «V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences», Russia, 109316, Moscow, Talalikhina str., 26, a.belozеров@fncps.ru

Semenov Evgeny V.

D. Sc., Professor of the Department Technology of products from vegetable raw materials and perfumery and cosmetic products, K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Russia, Moscow, Zemlyanoy Val St, 73, sem-post@mail.ru

Babakin Sergey B.

Ph. D., All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry — Branch of V. M. Gorbatov Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Russia, 127422, Moscow, Kostyakova str., 12, holod@mgupp.ru



DairyTech 2022

25–27 января 2022 г.

20-я Международная выставка оборудования для производства молока и молочной продукции **DairyTech 2022** – это единственная в России международная выставка, на которой представлен полный спектр оборудования для переработки молока и производства молочной продукции.

РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- ❖ Оборудование и технологии для первичной обработки молока
- ❖ Оборудование и технологии для производства молочной продукции:
- ❖ Упаковочное, фасовочное и розливное оборудование:

Место проведения:

Россия, Москва, МВЦ «Крокус Экспо», павильон 1
<http://www.crocus-expo.ru>

Организатор выставки: Hyve Group

Горячая линия
 +7 (495) 799-55-85
md@hyve.group
<https://dairytech-expo.ru>