

О влиянии фазовых переходов вода–лёд в глинистых грунтовых основаниях на теплопотери здания

Е.В.Левин, НИИСФ РААСН, Москва

А.Ю.Окунев, НИИСФ РААСН, ГУЗ, Москва

В статье рассмотрены особенности теплопереноса в грунтовых основаниях под зданиями, связанные с присутствием в грунте воды. Задачей исследования являлось показать влияние теплоты фазовых переходов, происходящих при замерзании и оттаивании воды, на тепловые потери из здания в грунтовое основание. Исследования выполнены с помощью постановки вычислительных экспериментов, основанных на расчётах нестационарных температурных полей в грунте. Рассматривались годовые циклы изменения температуры атмосферного воздуха, определяющие глобальную нестационарность переноса теплоты в грунте. Для решения задачи использована физико-математическая модель тепло- и массопереноса, учитывающая перенос грунтовой влаги, фазовые переходы в воде и изменения во времени величин теплотехнических характеристик грунта – коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости. Для учёта льдообразования получены полуэмпирические зависимости относительной льдистости грунтов от их температуры и влажности. С помощью проведения вычислительных экспериментов проанализировано влияние льдообразования в грунте по сравнению с расчётами, в которых льдообразование не учитывается. Установлено, что льдообразование приводит к изменениям температуры в приповерхностных слоях грунта с толщиной, большей толщины его промерзания. Эти изменения могут составлять до нескольких градусов Цельсия и могут существовать в течение полугода от начала промерзания грунта. Установлено, что льдообразование не приводит к существенным дополнительным тепловым потерям из здания в грунтовое основание. Изменение тепловых потерь за отопительный период и за год незначительно. Но при этом имеют место сравнительно небольшие, в пределах нескольких процентов, изменения максимальных и минимальных среднесуточных значений тепловых потоков. Данные среднесуточные отклонения возникают при ограниченных дистанциях по грунту между внутренним и наружным воздухом в пределах трёх-четырёх метров.

Ключевые слова: теплоперенос, массоперенос, нестационарные процессы, тепловые потоки, льдообразование, тепловые потери, грунтовое основание здания, влажность грунта, численное моделирование.

On the Influence of Water-Ice Phase Transitions in Clay Soil Bases on the Heat Losses of a Building

E.V.Levin, NIISF RAACS, Moscow

A.Yu.Okunev, NIISF RAACS, GUZ, Moscow

The article discusses the features of heat transfer in soil foundations under buildings associated with the presence of water in the soil. The objective of the study was to show the influence of the heat of phase transitions occurring during freezing and thawing of water on heat losses from the building to the ground foundation. The studies were carried out by setting up computational experiments based on calculations of nonsteady temperature fields in the soil. The annual cycles of atmospheric air temperature change were considered, which determine the global non-stationarity of heat transfer in the ground. To solve the problem, a physical and mathematical model of heat and mass transfer was used, considering the transfer of ground moisture, phase transitions in water, and changes in time in the values of the thermal characteristics of the soil – the coefficient of thermal conductivity and specific heat capacity. To take into account ice formation, semi-empirical dependences of the relative ice content of soils on their temperature and moisture were obtained. By means of computational experiments, the influence of ice formation in the soil is analyzed in comparison with calculations in which ice formation is not taken into account. It has been established that ice formation leads to temperature changes in the near-surface layers of the soil with a thickness greater than the thickness of its freezing. These changes can be up to several degrees Celsius and can exist for six months from the beginning of soil freezing. It has been established that ice formation does not lead to significant additional heat losses from the building to the ground foundation. The change in heat losses during the heating period and for the year is not significant. But at the same time, relatively small, within a few percent, changes in the maximum and minimum average daily values of heat fluxes take place. These average daily deviations occur with limited ground distances between indoor and outdoor air within 3–4 m.

Keywords: heat transfer, mass transfer, unsteady processes, heat flows, ice formation, heat losses, building ground foundation, soil moisture, numerical modeling.

В рамках выполнения требований Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»¹ в настоящее

¹ Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

время актуальными являются вопросы снижения тепловых потерь из зданий и сооружений. Одной из составляющих таких потерь является унос тепла в грунтовые основания, доля которого для первых и заглублённых в грунт этажей может составить значительную часть от всех трансмиссионных тепловых потерь.

По этой причине в последнее время в строительной области всё большее внимание уделяется вопросам изучения теплопереноса в грунтах. Данные задачи являются достаточно сложными по сравнению с анализом трансмиссионных теплопотерь из «надземной» оболочки здания. Причина состоит в том, что грунт в своём массиве, вовлечённом в теплообмен со зданием, обладает высокой теплоёмкостью и теплоперенос в нём является принципиально нестационарным за счёт переменного во времени теплообмена с окружающим воздухом. Глобальная нестационарность теплопереноса в грунте, и, следовательно, теплопотерь из здания в основание, как правило, имеет годовой повторяющийся характер. На самом деле всё гораздо сложнее, поскольку грунт содержит воду, которая способна мигрировать и претерпевать фазовые переходы «вода–лёд–вода» и «вода–пар–вода», которые сопровождаются тепловыми эффектами. Присутствие воды в жидкой и твёрдой фазах приводит также к изменениям теплотехнических параметров грунта – коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости. Нестационарные выделения и поглощения тепла, а также изменения теплотехнических параметров способны на фоне глобального характера теплопереноса повлиять на величины теплопотерь из здания.

Экспериментальное изучение теплопереноса в грунте и определение теплопотерь здания через грунтовое основание затруднено, так как для получения достаточно точных и объективных данных измерения должны производиться в период времени от нескольких лет до нескольких десятков лет. Задача расчёта тепловых потерь здания должна решаться численно с использованием достаточно полных физико-математической модели.

На практике при постановке расчётной задачи используются различные упрощения, наиболее распространённым из которых является допущение, что в грунте отсутствуют дополнительные тепловые эффекты, а теплотехнические характеристики грунта являются постоянными по его толщине и во времени. При таком подходе удаётся получить некоторые сравнительно простые аналитические решения [1–6], часть из которых легла в основу методик расчёта стационарных (за длительные периоды времени) теплопотерь через грунтовые основания. Например, результаты работы [1] используются в СП 50.13330.2012² как официальный метод расчёта сопротивления теплопередаче от здания в грунт, а результаты работ [5–7] вошли в Европейский стандарт³ по расчёту тепловых

потерь из зданий. Точность расчётов по СП 50.13330.2012 и по EN ISO 13370 постоянно обсуждается [8–10]. Модель с постоянными теплотехническими характеристиками грунта широко распространена и в численных исследованиях нестационарного теплопереноса. Большая часть исследований посвящена вопросам теплопотерь из зданий с фундаментом типа «плита по грунту» [11; 12], а в работах [13; 14] изучались тепловые потери для зданий с различным типом контакта с грунтовым основанием, включая также влияние на них подвижных грунтовых вод. Расчёты проводились для длительных (в несколько лет) периодов времени. При этом в настоящее время разработаны также и более полные методы расчёта тепловых потерь, которые максимально учитывают влияние на теплоперенос всех тепловых эффектов, связанных с присутствием в грунте воды [10; 15], а также и изменений теплотехнических характеристик грунтов. Численные модели, разработанные на основе этих методов, перегружены подробностями, являются громоздкими и обладают сравнительно низким быстродействием, в силу чего мало используются в исследовательской практике. В связи с этим возникают вопросы, какой степени полноты должна обладать физико-математическая модель, описывающая теплоперенос в грунте и используемая в качестве инструмента для проведения вычислительных экспериментов, чтобы с её помощью можно было проводить расчёты тепловых потерь через основания с точностью, не меньшей, чем точность современных теплотехнических инструментальных обследований ограждающих конструкций. Этот уровень точности в большинстве случаев составляет величину порядка 10 %.

Задача настоящей публикации – показать влияние теплоты фазовых переходов, происходящих при замерзании и оттаивании воды, на тепловые потери из здания в грунтовое основание.

Исследование выполнено с использованием численных решений краевой задачи нестационарного тепло-массопереноса в грунте. Ниже приведена использованная физико-математическая модель тепло-массопереноса, результаты исследований и следующие из них выводы.

Физико-математическая и численная модели

Баланс теплоты, воды, льда и водяного пара во влажном грунте описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

– уравнение переноса тепла для грунта, находящегося над поверхностью подвижных грунтовых вод:

$$\left(c_p - \alpha w \rho_{\text{сух}} \frac{\partial l}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} - \beta f + \text{div}(-\lambda \nabla T) = 0; \quad (1)$$

² СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: Стандартинформ, 2012. – 96 с.

³ European Committee for Standardization. Thermal Performance of Buildings–Heat Transfer Via the Ground–Calculation Methods. European Standard EN ISO 13370. Second edition. 2007-12-15.

– уравнение переноса тепла для грунта в водоносном слое:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - V\rho_{\text{сух}} c_w (w - w_{\text{кр}}) \frac{\partial T}{\partial n_v} + \text{div}(-\lambda \nabla T) = 0; \quad (2)$$

– уравнение капиллярного транспорта жидкости:

$$\rho_{\text{сух}} \frac{\partial w}{\partial t} + f + w\rho_{\text{сух}} \frac{\partial l}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = -k_1 \Delta P_w; \quad (3)$$

– уравнение диффузионного переноса пара:

$$\frac{\partial a}{\partial t} - f = -k_2 \Delta a. \quad (4)$$

Здесь T – температура (К); t – время (с); c и c_w – удельная теплоёмкость грунта и воды, соответственно (Дж/кг/К); λ – коэффициент теплопроводности грунта (Вт/м/К); ρ и $\rho_{\text{сух}}$ – плотность увлажнённого и сухого грунта соответственно (кг/м³); w – влажность грунта, определяемая как масса воды в грунте, отнесённая к массе высушенного грунта; l – относительная льдистость (доля замерзшей воды из общей влажности грунта без учёта прочносвязанной влаги); α – удельная теплота замерзания и таяния воды (Дж/кг/м³); β – удельная теплота испарения и конденсации воды (Дж/кг/м³); f – скорость конденсации-испарения воды в грунте, кг/м³/с; V – скорость течения воды в направлении n_v (м/с); $w_{\text{кр}}$ – критическая влажность грунта, соответствующая его водонасыщению (критическая влажность $w_{\text{кр}} \geq w_{\text{опт}}$, где $w_{\text{опт}}$ – оптимальная влажность⁴); $a = a(P_w, T)$ – содержание пара в единице объёма грунта (кг/м³); k_1 и k_2 – коэффициенты диффузии жидкости и пара, соответственно (м²/с); $P_w = P_w(w, T)$ – равновесное давление пара над мениском жидкости в капиллярах.

При записи системы уравнений (1) – (4) учтено, что объём грунта при увлажнении до оптимальной плотности меняется незначительно. Принято, что плотность грунта с изменением влажности (ниже и выше оптимальной) определяется по формуле:

$$\begin{cases} \rho = (1 + w)\rho_{\text{сух}}, w \leq w_{\text{кр}} \\ \rho = \rho_{\text{кр}} - (\rho_{\text{кр}} - \rho_w)(w - w_{\text{кр}}), w > w_{\text{кр}} \end{cases}. \quad (5)$$

Здесь плотность при критической влажности $\rho_{\text{кр}}$ – это суммарная плотность с учётом скелета грунта и влаги в нём.

Необходимые для расчётов удельная теплоёмкость и коэффициент теплопроводности определяются из следующих соотношений

$$\rho c = \rho_{\text{сух}} (c_{\text{сух}} + w(1 - l)c_{\text{воды}} + wl c_{\text{льда}}) \quad (6)$$

$$\lambda = \lambda_{\text{тал}} (1 - l) + \lambda_{\text{мерзл}} \cdot l, \quad (7)$$

где $c_{\text{воды}}$ и $c_{\text{льда}}$ – удельные теплоёмкости воды и льда, $\lambda_{\text{тал}} = \lambda(w, \rho_{\text{сух}})$ и $\lambda_{\text{мерзл}} = \lambda(w, \rho_{\text{сух}})$ – коэффициенты теплопроводности талого и мёрзлого грунтов. Величины $\rho_{\text{сух}}$, $\lambda_{\text{тал}}$ и $\lambda_{\text{мерзл}}$ для различных типов грунтов могут быть определены по табличным данным, в частности, по таблицам Б.6 и Б.8 Свода правил⁵.

Задав достаточно большую расчётную область в грунте с помощью численного решения системы уравнений (1) – (7), находим пространственно-временное распределение температуры, влажности и тепловых потоков. В качестве начального условия должно быть задано распределение температуры по объёму грунта. Оно может быть произвольным, но для сокращения объёма расчётов целесообразно использовать одномерное – от поверхности вглубь грунта – распределение температуры, полученное численными расчётами для многократно повторяющихся годовых циклов.

В качестве граничных условий при решении (1) – (7) необходимо использовать:

– для поверхности грунта вне здания: уравнения нестационарного конвективного теплообмена с наружным воздухом; уравнение нестационарного радиационного теплообмена с небом; нестационарный тепловой баланс по солнечному излучению; тепловой баланс за счёт испарения и конденсации воды;

– для границы грунта, находящейся в контакте с элементами здания: уравнение конвективного теплообмена с воздухом помещений; отсутствие потока влаги; баланс потока пара по разности его парциального давления;

– для боковых границ расчётной области: отсутствие теплового потока (условие адиабатичности) и отсутствие массовых потоков воды и пара;

– на границе с грунтовыми водами: отсутствие потока пара; непрерывность теплового потока; задание увлажнённости грунта, равной критической;

– на нижней границе расчётной области: условия адиабатичности и отсутствия потоков влаги и пара.

При численном решении краевой задачи (1) – (7) использована двухшаговая по времени конечно-разностная схема расчета [16]. Высокая устойчивость и второй порядок аппроксимации по пространству и времени в численной модели достигается за счёт использования метода Дюфорта-Франкеля [17; 18], в котором проводят осреднение центрального конечно-разностного элемента во вторых пространственных производных по двум соседним слоям по времени. Сшивка решений для температуры и влажности, а также в зонах образования высоких градиентов осуществляется с помощью методов сдвига сеточного решения по времени и простых итерационных процедур.

Прежде чем перейти к результатам расчётов теплопереноса, определим диапазоны, в которых могут изменяться теплотехнические параметры грунтов, а также льдистость при их замерзании. Наибольший интерес представляют глинистые грунты, среди которых рассмотрим глину и суглинок (глина со значительным количеством песка). Для сравнения рассмотрим также песчаный грунт, который используется в качестве оснований в строительстве.

⁴ ГОСТ 22733-2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности (с Поправкой) – М. : Стандартинформ, 2016. – 66 с.

⁵ СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями N 1–4). – М. :Стандартинформ, 2012. – 86 с.

Плотность сухого песка, суглинка и глины находится в пределах $\rho_{\text{сух}} = (1,6 \pm 0,1)10^3 \text{ кг/м}^3$. Теплоёмкость их скелета лежит в пределах $c_{\text{сух}} = (1,4 \pm 0,3) \text{ МДж/м}^3/\text{°C}$. Здесь меньшее значение соответствует пескам, а большее – глинам, у которых более высокая плотность. Что касается влажности, то прочные грунты, характеризующиеся достаточно высокой несущей способностью для строительства, ограниченно влагонасыщены.

Влажность этих грунтов находится в пределах оптимальной, соответствующей максимальной, плотности грунта (отсутствуют воздухозаполненные поры в грунте). При этом оптимальная влажность составляет приблизительно: для песка – 10%; для суглинка – 18%; для глины – 27%. То есть в целом для данной группы грунтов влажность находится в пределах $w = (18,5 \pm 8,5) \%$.

Данный диапазон влажности соответствует увеличению теплоёмкости за счёт воды в грунте в талом состоянии на величину $(1,0 \pm 0,7) \text{ МДж/м}^3/\text{°C}$ и в мёрзлом – соответственно $(0,5 \pm 0,3) \text{ МДж/м}^3/\text{°C}$.

По типам грунтов разброс величины удельной теплоёмкости составляет:

для песка:

в талом состоянии – $(1,6 \pm 0,3) \text{ МДж/м}^3/\text{°C}$; в мёрзлом состоянии – $(1,4 \pm 0,2) \text{ МДж/м}^3/\text{°C}$.

для суглинка:

в талом состоянии – $(2,1 \pm 0,5) \text{ МДж/м}^3/\text{°C}$; в мёрзлом состоянии – $(1,7 \pm 0,2) \text{ МДж/м}^3/\text{°C}$.

для глины:

в талом состоянии – $(2,7 \pm 0,7) \text{ МДж/м}^3/\text{°C}$; в мёрзлом состоянии – $(2,1 \pm 0,4) \text{ МДж/м}^3/\text{°C}$.

При относительной льдистости, отличной от нуля и единицы, удельная теплоёмкость определяется интерполяцией по ней между перечисленными значениями. Учитывая, что увлажнённость грунта сохраняется, а сам грунт постоянен по составу во времени, то интерполяция проводится без учёта

разбросов. Удельная теплоёмкость грунтов в зависимости от льдистости может быть записана в следующем виде:

– по всем типам глинистых грунтов:

$$1,9(1 - l) + 1,7l \pm (0,7 - 0,2l), \text{ МДж/м}^3/\text{°C}; \quad (8)$$

– для песка:

$$1,6(1 - l) + 1,4l \pm (0,3 - 0,1l), \text{ МДж/м}^3/\text{°C}; \quad (9)$$

– для суглинка:

$$2,1(1 - l) + 1,7l \pm (0,5 - 0,2l), \text{ МДж/м}^3/\text{°C}; \quad (10)$$

– для глины:

$$2,7(1 - l) + 2,1l \pm (0,7 - 0,3l), \text{ МДж/м}^3/\text{°C}. \quad (11)$$

Что касается коэффициента теплопроводности и его зависимости от влажности, то, ограничиваясь незасоленными грунтами, на основании данных таблицы Б.8⁶ можно сформулировать следующие величины и их разбросы:

песок, талое состояние – $1,1 \pm 0,2 + 8 \cdot (w - 0,05), \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}; \quad (12)$

песок, мёрзлое состояние – $1,2 \pm 0,2 + 10 \cdot (w - 0,05), \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}; \quad (13)$

суглинок, глина, талое состояние – $1,10 \pm 0,13 + 6 \cdot (w - 0,15), \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}; \quad (14)$

суглинок, глина, мёрзлое состояние – $1,23 \pm 0,15 + 8 \cdot (w - 0,15), \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}. \quad (15)$

При этом зависимость коэффициента теплопроводности от льдистости описывается формулой (7).

Рассмотрим теперь, каким образом при замерзании рассматриваемых грунтов происходит изменение их льдистости, знание величины которой необходимо для расчёта коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости по формулам (6), (7), (8) – (11).

⁶ СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями № 1-4). – М.: Стандартинформ, 2012. – 86 с.

Таблица 1. Зависимость относительной льдистости грунтов от температуры [19]

Температура, °C	Песок, $w_0^* = 11 \div 12\%$		Суглинок, $w_0 = 21 \div 22\%$		Глина, $w_0 = 30 \div 31\%$	
	мёрзлый	талый	мёрзлый	талый	мёрзлая	таяя
-0,3	0,94	0,97	0,19	0,42	0,0	0,00
-0,5; -0,6	0,95	0,97	0,31	0,48	0,0	0,12
-0,85; -1,0	0,97	0,99	0,43	0,55	0,0	0,21
-2,1	0,97	0,99	0,53	0,62	0,20	0,28
-3,0	–	–	0,55	0,63	0,30	0,37
-4,4; -4,5	0,97	1,00	0,56	–	0,33	–
-10,5	0,99	–	0,6	–	0,43	–
-15,2	1,00	1,00	0,66	0,70	0,49	0,52

* в таблице влажность w_0 – отношение веса воды и льда к весу увлажнённого грунта.

При отрицательных температурах в грунте происходит льдообразование, сначала замерзает свободная влага в грунте. При дальнейшем снижении температуры происходит постепенное замерзание капиллярносвязанной и рыхлосвязанной влаги. При этом, чем более мелкодисперсный грунт, тем замерзание при заданной отрицательной температуре менее полное. Зависимость относительной льдистости различных глинистых грунтов от температуры, полученная на основе эмпирических данных, представлена в таблице 1. Данные в таблице приведены для высокой влажности грунтов, близкой к оптимальной.

Из таблицы видно, что если для песка уже при $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически вся вода в грунте замёрзшая, то в глине замерзание при данной температуре отсутствует, что объясняется отсутствием в глине свободной влаги. В песке при влагонасыщении вода существует практически исключительно в свободном состоянии. Суглинок занимает промежуточное положение между глиной и песком и содержит около $1/3-1/4$ условно свободной влаги, которая замерзает при температуре близкой к нулю.

Как было отмечено ранее, влагонасыщение не является типичным состоянием для грунтов оснований под зданиями и их естественная влажность почти в два раза ниже приведённой в таблице 1. В силу этого тепловые эффекты, рассчитанные по данным таблицы 1, будут оценкой сверху для их вклада в тепловой режим в грунте под- и вокруг здания. Снижение влажности грунта приводит в первую очередь к снижению количества свободной влаги. При этом зависимость относительной льдистости от температуры для различных грунтов по своему характеру становится более близкой к глине, для которой промерзание около нуля градусов по Цельсию происходит не полностью.

Данные, приведённые в таблице 1, использованы для определения зависимости льдистости от температуры, которая является необходимой для решения системы уравнений тепло- массопереноса (1) – (15). При этом гистерезисные эффекты, возникающие при измерениях в процессе замерзания и измерениях в процессе оттаивания (данные таблицы 1 получены в результате экспериментальных измерений), отнесены к методическим погрешностям, связанным с тепло-

вой инерцией измеряемой системы и используемого оборудования. В результате после обработки данных таблицы 1 получены кусочно-непрерывные полиномиальные функции, описывающие зависимость льдистости песка, суглинка и глины от температуры. Полученные функции непрерывны сами и также непрерывны их производные. На рисунке 1 приведены эти зависимости для тех же влажностей, что и для данных, представленных в таблице 1.

Непрерывность производных потребовалась в связи со следующей моделью, описывающей тепловые эффекты в грунте: функция относительной льдистости от температуры должна быть непрерывна и дифференцируема, а значит тепловой эффект (σ , Вт/м³) при любом бесконечно малом изменении температуры должен быть бесконечно мал:

$$\sigma = -\alpha \rho_w \frac{dl}{dT} \frac{dT}{dt} . \tag{16}$$

Тепловой эффект (16) без учёта производной $\frac{dT}{dt}$ с точностью до знака эквивалентен теплоёмкости, связанной с фазовым переходом, и может быть добавлен в качестве слагаемого в формулы (8) – (11).

Рассмотрим теперь влияние льдообразования на нестационарные тепловые процессы, протекающие в грунте. Исследования выполнены численным методом с использованием приведённой выше физико-математической модели. Как указывалось, цель исследования – установить в какой степени фазовые переходы вода–лёд могут повлиять на тепловые потери из здания в грунтовые основания и необходим ли учёт этих фазовых переходов при проведении численных расчётов.

Результаты исследований

Исследования теплопереноса в грунте выполнены для климатических условий города Москвы, заданием плавного изменения среднесуточной наружной температуры в течение года по закону косинуса. Расчёты проводились за период глубиной не менее десяти лет, по истечении которого в грунте устанавливались периодически повторяющиеся годовые изменения тепловых потоков. В исследованиях проводилось сравнение результатов для двух серий расчётов. В первой серии учитывалось льдообразование и связанные с ним фазовые переходы. Во второй серии льдообразование не учитывалось (льдистость $l = 0$ и грунт все время талый). Сравнению подлежали:

- изменения температуры земли в зависимости от глубины для открытого грунта (над грунтом отсутствует здание);
- величины тепловых потерь из здания в основание через поверхность открытого грунта вокруг здания (в наружный воздух).

Тепловые потери сравнивались в зависимости от длины дистанции линии тока теплового потока от точки поверхности контакта здания с основанием до точки на открытой поверхности грунта (далее – дистанция).

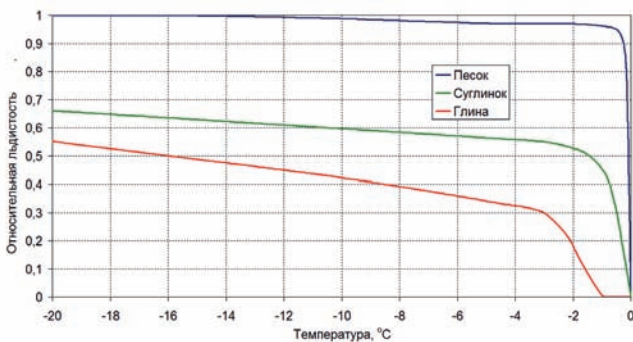


Рис. 1. Графики зависимости относительной льдистости от температуры для влагонасыщенных песка, суглинка и глины

На рисунках 2–4 представлены распределения температуры от глубины для различных дат в году. Расчетами установлено что для всех рассматриваемых грунтов на глубине 8 м температура постоянна и равна +5,8°С (в глубине грунта протекают быстрые грунтовые воды с температурой равной среднегодовой температуре воздуха).

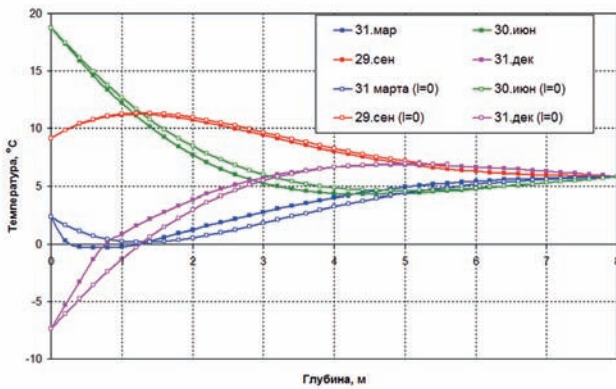


Рис. 2. Распределение температуры по глубине песчаного грунта с учётом льдообразования и без учёта ($l = 0$). Влажность грунта 12 %

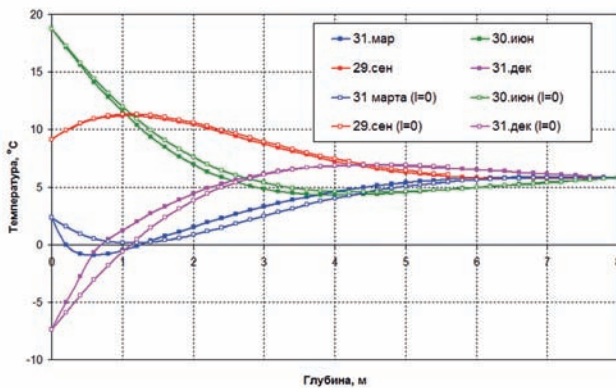


Рис. 3. Распределение температуры по глубине грунта из суглинка с учётом льдообразования и без учёта ($l = 0$). Влажность грунта 20 %

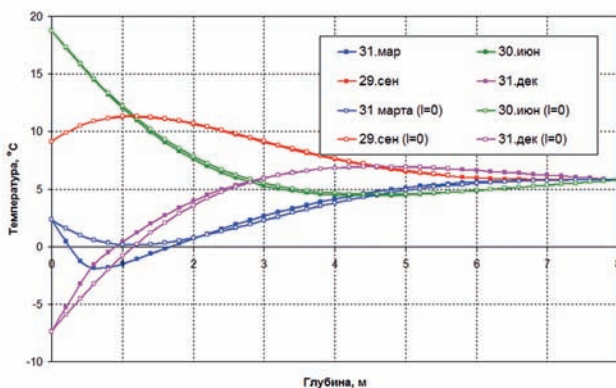


Рис. 4. Распределение температуры по глубине грунта из глины с учётом льдообразования и без учёта ($l = 0$). Влажность грунта 30%

Сравнивая данные, приведённые на рисунках 2–4, можно заключить следующее. На глубине до двух-трёх метров влияние промерзания грунта на температуру наиболее существенно и носит сезонный характер. В зимнее время, когда собственно и происходит замерзание, грунт оказывается более тёплым, чем в случае, когда в расчётах замерзание не учитывается. В модели без учёта замерзания грунт оказывается холоднее на 1–2 °С. В весенний период, когда лёд тает, – всё наоборот, и использование модели без учёта замерзания завышает температуру до 2,5 °С, причём для глины это завышение больше, чем для песка. С течением времени влияние прошедшего уже промерзания грунта распространяется на большие глубины (см. на рис. 2–4 кривые, соответствующие 30 июня), и только к концу сентября влияние промерзания сходит на нет.

Для анализа влияния учёта льдообразования на тепловые потери здания проведён расчёт аналогичный тому, результаты которого представлены на рисунках 2–4 за тем исключением, что со второй стороны области расчёта располагаются не быстрые грунтовые воды со среднегодовой температурой +5,8 °С, а помещение с температурой +20 °С. Такой расчёт позволяет учесть влияние того или иного фактора при рассмотрении теплопереноса по линии тока теплоты из здания на улицу. По отношению к фактическим теплопотерям здания такой расчёт, определяющий влияние льдообразования на теплопотери, является оценкой сверху, что связано с более коротким путём тепла от точки на полу здания до точки замерзания, которая лежит ниже поверхности грунта, а также с тем, что не учитываются теплопоступления из грунтовых вод в область отрицательных температур.

Результаты расчётов представлены в таблице 2, в ней же приведена плотность теплового потока (тепловых потерь) на полу здания, а также относительная разность плотности теплового потока, полученная для двух серий расчётов (с учётом и без учёта льдообразования). Плотность теплового потока представлена как среднегодовая, максимальная и минимальная среднесуточная.

Анализируя данные таблицы 2, можно заключить следующее. Влияние льдообразования в грунте на среднегодовые теплопотери незначительно. Отклонения в тепловых потерях, связанные с льдообразованием, составляют порядка нескольких процентов и реализуются в величинах максимальных и минимальных среднесуточных тепловых потоков, то есть связаны с требуемой мощностью отопления и кондиционирования, но практически не оказывают влияния на суммарные теплопотери здания за отопительный период. Существенным также является то, что при небольшой дистанции по массиву грунта между помещением и наружным воздухом, влияние льдообразования становится малозначительно, в том числе по пиковым значениям, что связано с прогревом грунта от здания.

Выводы

Проанализированы разбросы изменений величин коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости

Таблица 2. Влияние льдообразования в грунте на теплотери наружному воздуху

Дистанция, м	Тип грунта	Плотность теплового потока, Вт/м ²			Отклонение плотности теплового потока		
		средняя	мин.	макс.	среднее	мин.	макс.
10	песок	1,579	1,32	1,850	-	-	-
10	песок (l = 0)	1,573	1,295	1,851	0,38%	1,89%	-0,05%
10	суглинок	1,572	1,411	1,742	-	-	-
10	суглинок (l = 0)	1,573	1,399	1,747	-0,06%	0,85%	-0,29%
10	глина	2,073	1,817	2,337	-	-	-
10	глина (l = 0)	2,073	1,808	2,339	0,00%	0,50%	-0,09%
8	песок	1,967	1,364	2,590	-	-	-
8	песок (l = 0)	1,966	1,331	2,602	0,05%	2,42%	-0,46%
8	суглинок	1,966	1,543	2,408	-	-	-
8	суглинок (l = 0)	1,966	1,517	2,416	0,00%	1,69%	-0,33%
8	глина	2,592	1,948	3,253	-	-	-
8	глина (l = 0)	2,592	1,932	3,252	0,00%	0,82%	0,03%
6	песок	2,623	1,208	4,018	-	-	-
6	песок (l = 0)	2,622	1,167	4,076	0,04%	3,39%	-1,44%
6	суглинок	2,622	1,496	3,769	-	-	-
6	суглинок (l = 0)	2,622	1,446	3,797	0,00%	3,34%	-0,74%
6	глина	3,456	1,832	5,113	-	-	-
6	глина (l = 0)	3,456	1,811	5,101	0,00%	1,15%	0,23%
4	песок	3,933	0,743	6,84	-	-	-
4	песок (l = 0)	3,933	0,727	7,138	0,00%	2,15%	-2,89%
4	суглинок	3,932	1,020	6,677	-	-	-
4	суглинок (l = 0)	3,933	0,995	6,870	-0,03%	2,45%	-2,89%
4	глина	5,184	1,208	9,077	-	-	-
4	глина (l = 0)	5,184	1,197	9,17	0,00%	0,91%	-1,02%
3	песок	5,244	0,539	9,601	-	-	-
3	песок (l = 0)	5,243	0,537	9,950	0,02%	0,37%	-3,64%
3	суглинок	5,243	0,699	9,468	-	-	-
3	суглинок (l = 0)	5,243	0,694	9,793	0,00%	0,72%	-3,43%
3	глина	6,912	0,846	12,774	-	-	-
3	глина (l = 0)	6,912	0,845	12,979	0,00%	0,12%	-1,60%
2	песок	7,866	0,516	14,975	-	-	-
2	песок (l = 0)	7,865	0,516	15,214	0,01%	0,00%	-1,60%
2	суглинок	7,865	0,570	14,888	-	-	-
2	суглинок (l = 0)	7,865	0,567	15,163	0,00%	0,53%	-1,85%
2	глина	10,367	0,727	19,835	-	-	-
2	глина (l = 0)	10,367	0,727	20,008	0,00%	0,00%	-0,87%
1	песок	15,730	0,89	30,558	-	-	-
1	песок (l = 0)	15,730	0,890	30,570	0,00%	0,00%	-0,04%
1	суглинок	15,730	0,897	30,515	-	-	-
1	суглинок (l = 0)	15,730	0,897	30,563	0,00%	0,00%	-0,16%
1	глина	20,735	1,179	40,255	-	-	-
1	глина (l = 0)	20,735	1,179	40,291	0,00%	0,00%	-0,09%

глинистых грунтов, включая песок, суглинок и глину, с учётом их зависимости от влажности и льдистости. Показано, что с учётом полученных разбросов удельная теплоёмкость в зависимости от влажности и льдистости может претерпевать большие изменения, чем коэффициент теплопроводности.

Получены полуэмпирические зависимости относительной льдистости грунтов от их температуры. Полученные зависимости использованы в разработанных физико-математической и численной моделях для расчёта нестационарного теплопереноса в грунтах под зданием и вокруг него. С помощью проведения вычислительных экспериментов проанализировано влияние льдообразования в грунте по сравнению с расчётами, в которых льдообразование не учитывается. В результате расчётов установлено следующее.

- Расчёт распределения температуры в грунте без учёта льдообразования приводит к неточностям в величинах получаемой температуры на глубинах, превышающих глубину промерзания грунта. В зимний и весенний периоды существуют наиболее существенные неточности. В фазе промерзания грунта температура оказывается заниженной, а в фазе его оттаивания – завышенной в пределах нескольких градусов на глубине до двух-трёх метров. Далее с течением времени неточности возникают и на больших глубинах, но примерно через полгода влияние льдообразования на точность расчётов исчезает. При этом расчётная модель без учёта льдообразования может быть пригодна для определения достаточных условий непромерзания основания под фундаментам.

- Учёт льдообразования не приводит к существенному изменению рассчитываемых тепловых потерь от здания через грунтовое основание. Среднегодовые (а также средние за отопительный или тёплый период года) величины тепловых потоков через грунтовое основание изменяются незначительно. Но при этом имеют место сравнительно небольшие, в пределах нескольких процентов, изменения максимальных и минимальных среднесуточных значений тепловых потоков. Данные среднесуточные отклонения возникают при ограниченных дистанциях по грунту между внутренним и наружным воздухом в пределах трёх-четырёх метров. При меньших дистанциях тепловой нагрев основания зданием уменьшает льдообразование, а при больших – область, в которой происходит льдообразование, мала по сравнению с массивом непромерзающего грунта.

Литература

1. *Мачинский, В.Д.* Теплопередача в строительстве / В.Д. Мачинский. Издание 3, исправленное и дополненное. – М.–Л.: Госстройиздат, 1939. – 344 с.
2. *Власов, О.Е.* Основы строительной теплотехники / О.Е. Власов. – М.: Издание военно-инженерной академии РККА, 1938. – 96 с.
3. *Фокин, К.Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин; Под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина; 5-е изд., пересмотр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
4. *Macey, H.N.* Heat loss through a solid floor / H.N. Macey // Journal of the Institute of Fuel. – 1949. – Vol. 22. – P. 369–371.

5. *Anderson, B.R.* Calculation of the steady-state heat transfer through a slab-on ground floor / B.R. Anderson // Building and Environment. – 1991. – Vol. 26. – P. 405–415.

6. *Anderson B.R.* The effect of edge insulation on the steady-state heat transfer through a slab-on-ground floor / B.R. Anderson // Building and Environment. – 1993. Vol. 28. – 361–367.

7. *Hagentoft C-E.* Heat Loss to the Ground from a Building. Slab on the ground and cellars / C-E. Hagentoft // 1988. Report TVBH-1004 / Department of Building Technology. – Sweden : Lund Institute of Technology. – 215 p.

8. *Дячек П.И.* Формирование температурного поля грунтов у здания и потери теплоты через полы по грунту и заглублённые части стен / П.И. Дячек, С.А. Макаревич, Д.Г. Ливанский // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2016. – №11 (179). – С. 43–50.

9. *Окунев, А.Ю.* Методы расчёта теплопотерь через основания зданий и сооружений / А.Ю. Окунев, Е.В. Левин // Жилищное строительство. – 2016. – № 6. – С. 25–28.

10. *Janssen, H.* The influence of soil moisture transfer on building heatloss via the ground / H. Janssen, J. Carmeliet, H. Hens // Building and Environment. – 2004. – V. 39 – P. 825–836.

11. *Dong Zhu Chen.* Dynamic three-dimensional heat transfer calculation for uninsulated slab-on-ground constructions/ Dong Zhu Chen // Energy and Buildings. – 2013. – V. 60. – P. 420–428.

12. *Jukka Rantala.* Heat loss into ground from a slab-on-ground structure in a floor heating system / Rantala Jukka, LeivoVirpi // International Journal of Energy Research. – 2006. – V.30 (12). – P. 929–938.

13. *Окунев, А.Ю.* Численные исследования нестационарного теплопереноса в основаниях зданий. Отапливаемый заглублённый этаж / А.Ю. Окунев, Е.В. Левин // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 6. – С. 55–57.

14. *Левин, Е.В.* Теплоперенос в грунтовых основаниях зданий. Влияние утепленной отмостки/ Е.В. Левин, А.Ю. Окунев // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 3 (83). – С.83–93.

15. *Павлов, А.Р.* Итерационная разностная схема для задачи теплопереноса при промерзании грунтов / А.Р. Павлов, М.В. Матвеева // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. – 2007. – №6 (56). – С. 242–253.

16. *Марчук, Г.И.* Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1980. – 535 с.

17. *Роуч, П.* Вычислительная гидродинамика / П. Роуч, пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 616 с.

18. *Du Fort E.C.* Conditions in the numerical treatment of parabolic differential equations / E.C. Du Fort, S.P.Frankel // Math. Tables Other Aids Comput. 1953. – Vol. 43. – P.135–152.

19. *Цытович, Н.А.* Механика мёрзлых грунтов/ Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 468 с.

References

1. *Machinskii V.D.* Teploperedacha v stroitel'stve [Heat transfer in construction]. Moscow–Leningrad, Gosstroizdat Publ., 1939, 344 p. (In Russ.)

2. Vlasov O.E. Osnovy stroitel'noi teplotekhniki [Fundamentals of building heat engineering]. Moscow, The Military Engineering Academy of the Red Army Publ., 1938, 96 p. (In Russ.)
3. Fokin K. F. Stroitel'naya teplotekhnika ograždnykh chastei zdaniï [Construction heat engineering of enclosing parts of buildings]. Yu.A. Tabunshchikov, V.G. Gagarin (eds.). Moscow, AVOK-PRESS, 2006, 256 p. (In Russ.)
4. Macey H.H. Heatloss through a solid floor. In: *Journal of the Institute of Fuel*, 1949, Vol. 22, pp. 369–371
5. Anderson B.R. Calculation of the steady-state heat transfer through a slab-on ground floor // *Building and Environment*, 1991, Vol. 26, pp. 405–415. (In Engl.)
6. Anderson B.R. The effect of edge insulation on the steady-state heat transfer through a slab-on-ground floor In: *Building and Environment*, 1993, Vol. 28, pp. 361–367. (In Engl.)
7. Hagentoft C-E. Heat Loss to the Ground from a Building. Slab on the ground and cellars. In: 1988. *Report TVBH-1004*. Sweden, Lund Institute of Technology, 215 p. (In Engl.)
8. Dyachek P. I., Makarevich S. A., Livanskii D. G. Formirovanie temperaturnogo polya gruntov u zdaniya i poteri teploty cherez poly po gruntu i zaglublennye chasti sten [Formation of the temperature field of soils near the building and heatloss through floors along the ground and buried parts of the walls]. In: *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie [Plumbing, heating, air conditioning]*, 2016, no. 11, pp. 43–50. (In Russ., abstr. in Engl.)
9. Okunev A.Yu., Levin E.V. Metody rascheta teplopoter' cherez osnovaniya zdaniï i sooruzhenii [Methods for calculating heatloss through the foundations of buildings and structures]. In: *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2016, no. 6, pp. 25–28. (In Russ., abstr. in Engl.)
10. Janssen H., Carmeliet J., Hens H. The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. In: *Building and Environment*, 2004, Vol. 39, pp. 825–836. (In Engl.)
11. Dong Zhu Chen. Dynamic three-dimensional heat transfer calculation for uninsulated slab-on-ground constructions. In: *Energy and Buildings*, 2013, Vol. 60, pp. 420–428. (In Engl.)
12. Jukka Rantala, Virpi Leivo. Heat loss into ground from a slab-on-ground structure in a floor heating system. In: *International Journal of Energy Research*, 2006, Vol. 30 (12), pp. 929–938. (In Engl.)
13. Okunev A.Yu., Levin E.V. Chislennyye issledovaniya nestatsionarnogo teploperenosa v osnovaniyakh zdaniï. Otaplivaemy i zaglublennyy etazh [Numerical studies of unsteady heat transfer in building foundations. Heated recessed floor]. In: *BST. Byulleten' stroitel'noi tekhniki [BST. Bulletin of construction equipment]*, 2019, no. 6, pp. 55–57. (In Russ., abstr. in Engl.)
14. Levin E.V., Okunev A.Yu. Teploperenos v gruntovykh osnovaniyakh zdaniï. Vliyaniye uteplennoi otmostki [Heat transfer in the subsoil of buildings. Influence of the insulated blind area]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Construction and reconstruction]*, 2019, no. 3 (83), pp. 83–93. (In Russ., abstr. in Engl.)
15. Pavlov A.R., Matveeva M.V. Iteratsionnaya raznostnaya skema dlya zadachi teplomassoperenosa pri promerzanii gruntov [An iterative difference scheme for the problem of heat and mass transfer during freezing of soils. Estestvennonauchnaya seriya] In: *Vestnik of Samara State University. Natural Science Series*, 2007, no. 6 (56), pp. 242–253. (In Russ., abstr. in Engl.)
16. Marchuk G.I. Metody vychislitel'noi matematiki [Methods of computational mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 535 p. (In Russ.)
17. Rouch P. Vychislitel'naya gidrodinamika [Computational fluid dynamics], Trans. from Engl. Moscow, Mir Publ., 1980, 616 p. (In Russ.)
18. Du Fort E.C. and Frankel S.P. Conditions in the numerical treatment of parabolic differential equations. In: *Math. Tables Other Aids Comput.*, 1953, Vol. 43, pp. 135–152. (In Engl.)
19. Tsytoich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of frozen soils]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1973, 468 p. (In Russ.)

Левин Евгений Владимирович (Москва). Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Главный научный сотрудник ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (127283, Россия, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: aqwsrv@list.ru.

Окунев Александр Юрьевич (Москва). Кандидат физико-математических наук. Главный научный сотрудник ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (127283, Россия, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН); доцент ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству» (105064, Москва, ул. Казакова, 15. ГУЗ) Эл. почта: okunevay@gmail.com.

Levin E. V. (Moscow). Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238. NIISF RAACS). E-mail: niisf@niisf.ru

Okunev A. Yu. (Moscow). Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238. NIISF RAACS); State University of Land Use Planning (15 Kazakov st., Moscow, 105064. GUZ). E-mail: info@guz.ru.