

## ТЕПЛОПЕРЕНОС В ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЯХ ЗДАНИЙ. ВЛИЯНИЕ УТЕПЛЕННОЙ ОТМОСТКИ

ЛЕВИН Е.В.<sup>1</sup>, ОКУНЕВ А.Ю.<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

***Аннотация.** В малоэтажном строительстве большое значение в тепловом балансе имеют тепловые потери в грунтовые основания. По ряду технических причин данный вопрос является недостаточно изученным. В работе предложена физико-математическая и численная методика расчета нестационарного теплопереноса, учитывающего годовые изменения температуры атмосферного воздуха. Предложена модель расчета теплопотерь в грунтовых водах. Численная модель основана на использовании явного двухшагового по времени высокоустойчивого конечно-разностного метода. Объектами проведенного исследования являются неотапливаемое и отапливаемое здание с фундаментом типа плита по грунту. Рассматривается влияние утепленной отмостки на температурное поле под зданием и теплопотери в грунт. Показана роль термического сопротивления отмостки и ее геометрического размера.*

***Ключевые слова:** численное моделирование, температура, нестационарный теплоперенос, основание здания, отмостка.*

## HEAT TRANSFER IN SOIL FOUNDATIONS OF BUILDINGS. IMPACT OF INSULATED BLIND AREA

LEVIN E.V.<sup>1</sup>, OKUNEV A.Yu.<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Construction Physics of RAACS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>State University of Land Management, Moscow, Russia

***Abstracts.** In low-rise construction, heat losses to soil foundations are of great importance in the heat balance. For a number of technical reasons, this subject is not well understood. The paper proposes a physical-mathematical and numerical method for calculating unsteady heat transfer, which takes into account outside temperature year changing. A model for calculating heat losses in groundwater is proposed. The numerical model is based on the use of an explicit two-step-in-time, highly stable finite difference computational method. The objects of the study are unheated and heated building with a foundation like a slab on the ground. The effect of insulated blind area on the temperature field under the building and heat loss to the ground is considered. The role of thermal resistance of the blind area and its geometric size is shown.*

***Keywords:** numerical simulation, temperature, unsteady heat transfer, building foundation, blind area.*

### Введение

В строительной отрасли достаточно большее внимание уделяется вопросам энергосбережения и механической устойчивости при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений. Отдельной строкой здесь проходят малоэтажные строительные объекты, к которым относятся многие производственные здания, складские сооружения, общественные здания (магазины, кинотеатры, офисы и др.), а также многоквартирные и малоквартирные жилые дома. Общей характеристикой малоэтажных строительных объектов является то, что у них площадь контакта здания с грунтовым основанием является заметно большей величиной по отношению к площади оболочки, контактирующей с наружным воздухом. По этой причине для таких зда-

ний теплопотери через основание могут составлять значительную долю от общих трансмиссионных теплопотерь и должны учитываться в общем тепловом балансе. Фундаменты малоэтажных зданий, как правило, являются мелкозаглубленными и малонагруженными, что может вызвать определенные механические проблемы за счет морозного пучения грунта при образовании под зданием отрицательной температуры в зимнее время. Отсюда возникает задача анализа теплопереноса в системе здание - грунтовое основание и к расчету всех необходимых параметров, включая конструкцию тепловой защиты элементов здания, контактирующих с основанием.

Решение подобной задачи встречается со многими физическими и математическими трудностями, которые связаны со сложной структурой грунтов и теплофизических процессов в них протекающих. Это, прежде всего, тепловые эффекты за счет фазовых переходов в воде, капиллярная и сезонная миграция воды, влияние грунтовых вод, в которых происходит конвективный унос тепла и, самое главное, нестационарность теплопереноса. Грунт является высокоинерционным аккумулятором тепла, подверженным сезонным и суточным нестационарным температурным воздействиям со стороны атмосферного воздуха. Существующие инструменты инженерного расчета теплопереноса в основаниях условно можно разбить на аналитические [1-6] и численные [7-12] методики. Первые из них удобны для применения на практике, но в силу того, что разработаны с использованием значительных упрощений при постановке решаемой задачи, дают оценочные результаты. Детально учесть нестационарность теплопереноса аналитические методики принципиально не дают возможности. Численные методики во многом устраняют проблемы, связанные с нестационарностью и сложностью теплопереноса, и на практике должны быть основным инструментом при проведении инженерных расчетов. Для того, чтобы ими можно было эффективно пользоваться предварительно должен быть выполнен цикл исследований, качественно показывающих основные закономерности теплопереноса и тепловых потерь, которые могут встречаться в системе здание - грунтовое основание [13-15].

Настоящая публикация посвящена части таких исследований, целью которых является показать, каким образом утепление поверхности грунта вблизи стен здания может повлиять на температурный режим под ним и на теплопотери в основание. Утепление может быть, как естественным (например, снежный или травяной покров), так и искусственным в виде отмостки с утепляющим слоем. Отмостка с утеплителем широко используется на практике, например, для фундаментов по типу плита на грунте [16].

В качестве объектов исследования выбраны неотапливаемое и отапливаемое здания на плитном фундаменте. Для неотапливаемого здания (здание в процессе строительства, реконструкции, склады, ангары и пр.) исследуется возможность исключения образования под фундаментом отрицательной температуры. Для отапливаемого здания анализу подлежат параметры отмостки, которые могут позволить заметно снизить теплопотери в грунтовое основание. Исследования выполнены с помощью постановки вычислительных экспериментов.

### Метод исследования

В качестве метода исследования использовано проведение серии вычислительных экспериментов на основе численного решения краевой задачи нестационарного теплопереноса в ограниченной расчетной области, моделирующей грунтовое основание, находящееся под зданием, и участок открытого грунта вне здания. В общем случае рассматривается трехмерная пространственная задача. Предполагается, что под расчетной областью может находиться водоносный слой. В отдельных случаях для сокращения объема вычислительной работы задача сводится к двумерной (ширина - глубина) путем использования эффективной расчетной ширины здания в виде отношения внутренней площади перекрытия здания по основанию к полупериметру [17, 18].

В физико-математической модели теплоперенос в расчетной области грунтового основания описывается уравнением теплопроводности

$$c \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}(-\lambda \operatorname{grad} T) = 0 \quad (1)$$

Здесь  $T$  – температура;  $t$  – время;  $c$  – удельная теплоемкость грунта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности. В модели полагается, что грунт имеет слоистую структуру, в каждом слое которой  $c$  и  $\lambda$  могут оказаться различными, но постоянными постоянны, хотя для численного моделирования это не является принципиальным.

В качестве начального условия задается распределение температуры вглубь грунта, соответствующее распределению температуры в открытом грунте для климатических условий данной местности на время начала расчетов  $t_0$

$$T(0, x) = T^*(t_0, x) \quad (2)$$

Распределение  $T^*(t_0, x)$  получается как решение одномерной задачи нестационарного теплопереноса для периода времени в несколько десятков лет (в этом случае оно становится квазистационарным для годовых циклов и практически не будет зависеть от используемого начального условия). Достаточно просто его можно получить с помощью численных расчетов.

Граничные условия для краевой задачи имеют следующий вид:

$$T = \operatorname{const} \quad (3)$$

- условие постоянства температуры. Может быть использовано для нижней границы расчетной области грунтового основания.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

- условие отсутствия (малости) потока тепла. Может быть использовано для боковых и нижней границы расчетной области грунтового основания.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T(t)^{\operatorname{out}} - T) \quad (5)$$

- условие непрерывности теплового потока для теплообмена с окружающей средой. Может быть использовано для наружной поверхности грунта вне здания, а также внутри здания на границах его элементов, контактирующих с грунтом. Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ),  $T^{\operatorname{out}}$  – температура воздуха, которая может меняться во времени.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\alpha (T(t)^{\operatorname{out}} - T)}{\alpha R + 1} \quad (6)$$

- условие, аналогичное (5) для теплозащищенной поверхности с термическим сопротивлением утепления  $R$ , ( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ). Под тепловой защитой подразумевается утепление элементов конструкции внутри здания или естественное образование тепловой защиты на поверхности грунта (снег, травяной покров и пр.).

Между слоями грунта с постоянными  $c$  и  $\lambda$  должно быть использовано граничное условие, соответствующее непрерывности теплового потока

$$\lambda_m \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|^+ = \lambda_{m+1} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|^- \quad (7)$$

В модели на нижней границе основания, контактирующей с грунтовыми водами, используется граничное условие

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\bar{T}^w - T}{\bar{R}^w} \quad (8)$$

где

$$\bar{R}^w = \frac{2}{3\lambda^w} \sqrt{\frac{2a^w}{w}} L \quad (9)$$

- среднее по ширине основания термическое сопротивление водоносного слоя,  $\bar{T}^w$  – температура грунта в водоносном слое,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта над водоносным слоем,  $\lambda^w$  – коэффициент теплопроводности грунта в водоносном слое,  $w$  – средняя по толщине плотность потока воды в водоносном слое ( $\text{м}^3/\text{м}^2/\text{с}$ ),  $a^w = \lambda^w / c^w$  – коэффициент температуропроводности водоносного слоя,  $c^w$  – удельная теплоемкость грунта в водоносном слое,  $L$  - характерный размер расчетной области в направлении движения воды. Температура  $\bar{T}^w$  в общем случае зависит от глубины. На практике на сравнительно небольших глубинах (например, для Московского региона для глинистых грунтов это 6-8 метров) температура  $\bar{T}^w$  уже практически постоянна и соответствует среднегодовой температуре наружного воздуха. Средняя величина плотности потока воды в грунтовых водах может находиться в пределах от  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$  м/с – для песчаных и гравийных грунтов, до  $10^{-10}$  -  $10^{-14}$  м/с – для глинистых грунтов высокой степени уплотнения.

Для численного решения краевой задачи (1) – (8) используется явный двухшаговый по времени конечно-разностный метод, принцип построения которого поясняется уравнениями (10) и (11) на примере одномерного по координате уравнения теплопроводности и его конечно-разностной аппроксимации

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2}, \quad (10)$$

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^{n-1}}{2\Delta\tau} = \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta\eta^2} \approx \frac{T_{i+1}^n - (T_i^{n+1} + T_i^{n-1}) + T_{i-1}^n}{\Delta\eta^2}, \quad (11)$$

здесь  $\tau = t / \tau^0$  - безразмерное время,  $\eta = x / X$  - безразмерная координата,  $\tau^0 = X^2 c / \lambda$  - масштаб времени,  $X$  - характерный размер расчетной области,  $n$  – номер шага по времени,  $i$  – номер узла на пространственной расчетной сетке.

В (11) первый вариант сеточной аппроксимации второй производной по координате соответствует явной схеме Ричардсона, которая хоть и обладает вторым порядком точности, но является абсолютно неустойчивой [19] и для расчетов не годится. Второй, используемый в численной модели, вариант аппроксимации соответствует схеме «чехарда» (или, как ее называют по имени авторов – схеме Дюфорта-Франкеля) [19], которая является абсолютно устойчивой, т.е. расчеты могут проводиться с любыми по величине шагами по времени  $\Delta\tau$  и пространству  $\Delta\eta$ . Порядок точности схемы Дюфорта-Франкеля определяется как

$$o(\Delta\tau^2, \Delta\eta^2, (\Delta\tau / \Delta\eta)^2), \quad (12)$$

т.е. является вторым по пространству и времени, но для обеспечения высокой точности дополнительно требует выполнения условия  $\Delta\tau < \Delta\eta$ . В целом схема Дюфорта-Франкеля при заданной точности имеет быстроедействие, в несколько раз превышающее быстроедействие наиболее часто используемой на практике явной одношаговой по времени схемы. Причем при решении трехмерной задачи ее преимущества увеличиваются.

### Результаты и обсуждение

Рассмотрим теперь результаты исследований теплопереноса, показывающие влияние утепленной отмостки на тепловой режим основания и теплопотери из здания. Во всех расчетах для упрощения анализа использовались параметры однородного по всей расчетной области глинистого грунта ( $\lambda=1,5$  Вт/(м·°С),  $c=10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·°С)). Под основанием на глубине 8-10 метров расположен водоносный слой, среднее термическое сопротивление (9) для которого составляет  $\bar{R}^w=10^{-2}$  °С·м<sup>2</sup>/Вт. Такое термическое сопротивление может соответствовать сравнительно высокой плотности потока воды на уровне  $w=10^{-2}$ - $10^{-3}$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>/с.

Принятые во всех расчетах колебания температуры наружного воздуха соответствовали плавному изменению среднемесячной температуры в Московском регионе и с помощью граничных условий (5) и (6) задавалась периодическая годовая нестационарность теплопереноса в основании. По истечении нескольких десятков расчетных лет нестационарность принимала вид периодически повторяющихся годовых колебаний температуры в толще грунта.

Неотапливаемое здание на плитном фундаменте.

Данное исследование предназначено для оценки температурного режима основания с целью определения степени защищенности фундамента от вероятного воздействия морозного пучения. Базовые расчеты проведены при высоком термическом сопротивлении утепления плиты  $R_{п}=8 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$  (здание изначально проектируется к эксплуатации, как неотапливаемое, а теплозащита фундамента служит элементом защиты от морозного пучения) и расчетной ширине фундамента  $B=8\text{м}$ . Из данных, приведенных на рисунке 1 а), видно, что в установившемся на 15-й год циклическом годовом колебательном температурном режиме под фундаментом вблизи его края в течение января-февраля может иметь место стабильное повторяющееся зимнее промерзание грунта. Размеры области отрицательных температур под фундаментом порядка полуметра в вертикальном и горизонтальном направлениях. В более ранние годы относительно начала расчетов локализация промерзания и его продолжительность имели больший масштаб. Пунктиром на графике отмечена наружная граница плиты фундамента. На кадрах:  $Y$  – номер года после начала расчетов,  $M$  – номер месяца в году. Расчеты начинаются с января. Температурное поле показано для правой полуширины основания на последний день каждого месяца.

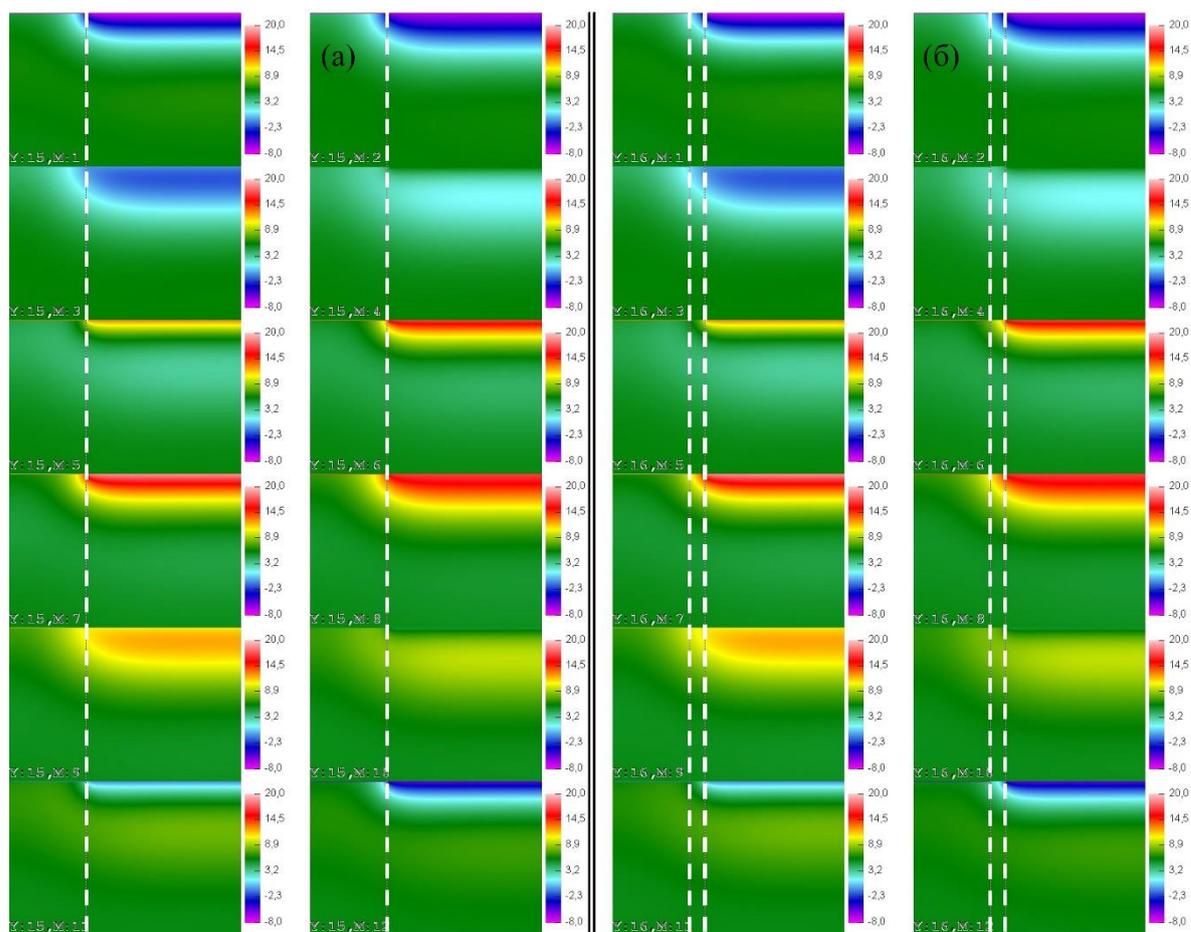


Рисунок 1 – Распределения температуры в основании под неотапливаемым плитным фундаментом: а) - без утепленной отмостки, б) - с утепленной отмосткой

На рисунке 1 б) к фундаменту добавлена утепленная отмостка шириной 0,8м с термическим сопротивлением  $R_o = 2 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$  (границы отмостки отмечены пунктирами). Результаты приведены для 16-го года эксплуатации (появление отмостки увеличило инерционность установления повторяющегося колебательного изменения температуры на один год). Видно, что такое решение позволяет фактически исключить отрицательные температуры под плитой самого фундамента и вероятное промерзание грунта под ним. Использование сравнительно небольшой механически не нагруженной как фундамент отмостки гораздо более проще в реализации, нежели обустройство непучинистой подушки под всем фундаментом.

На рисунке 2 приведены графики зависимости температуры под ребром фундаментной плиты от времени для различных вариантов утепления плиты и отмостки. Расчеты приведены для тех же условий, что и на рисунке 1, только изменяется термическое сопротивление утепления плиты. Отмостка, там, где она есть, имеет ширину 0,8м и термическое сопротивление  $R_o = 2 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$ . Термическое сопротивление утепления плиты приведено на графике в виде легенды. Закрашенные маркеры соответствуют плите с отмосткой, пустые – без отмостки. Приведенные на рис.2 данные соответствуют первым четырем годам эксплуатации неотапливаемого фундамента. В последующие годы могут наблюдаться только незначительные количественные различия.

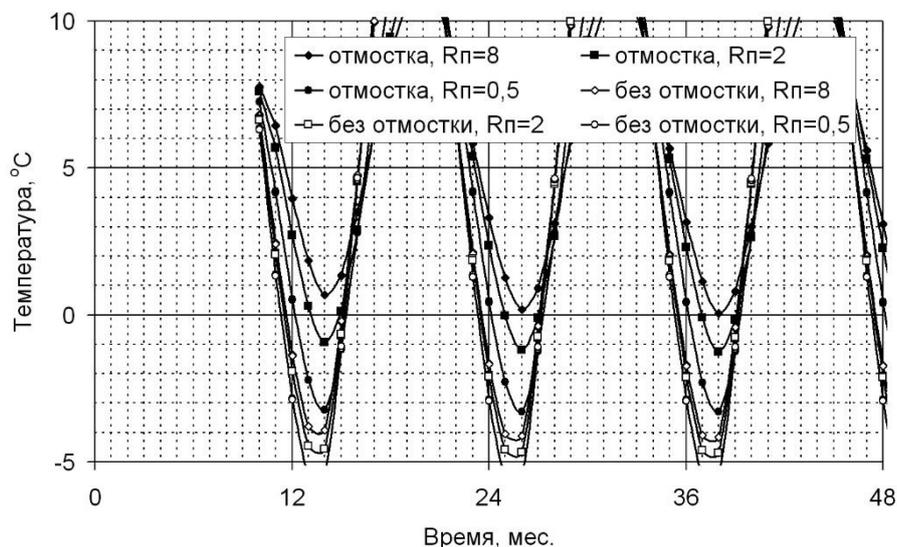


Рисунок 2 - Зависимость температуры под краем утепленной плиты от времени для различных вариантов утепления

Из рисунка 2 следует, что основное влияние на поддержание положительной температуры под плитой оказывает утепленная отмостка, обеспечивающая затруднение уноса тепла наружному воздуху из массива основания под зданием. Большое значение имеет и величина утепления самого фундамента, но, в принципе, для достижения поставленной цели термическое сопротивление отмостки может быть гораздо ниже, чем у фундамента. За счет утепления отмостки могут быть снижены требования к утеплению самого фундамента.

Рассмотрим теперь влияние отмостки, в том случае, когда здание на плитном фундаменте является отапливаемым. Как можно понять из вышеприведенных результатов, в этом случае за счет поступления тепла из самого здания вероятность промерзания грунта под фундаментом может быть практически исключена и вопрос только в том, каким образом наличие отмостки может сократить тепловые потери из здания в основание.

Отапливаемое здание на плитном фундаменте.

Рассмотрим теперь влияние отмостки на теплопотери в отапливаемом здании, также расположенном на плитном фундаменте. Температура в здании в течение всего времени поддерживается постоянной +20°C. Остановимся на варианте, когда плитный фундамент является

неутепленным. В этом случае роль утепленной отмостки может оказать наибольшее влияние на величину теплопотерь. Расчетная ширина здания  $B$  составляет 14 метров, а ширина расчетной области по грунту – 40 метров. Толщина стен здания – 0,25 м. Унос тепла через пол происходит в грунтовые воды и в воздух над поверхностью грунта и отмосткой. Поверхность грунта задается неутепленной (отсутствие снежного или травяного покрова), а отмостка может иметь различное утепление с термическим сопротивлением  $R_o$  °С·м<sup>2</sup>/Вт и различную ширину  $L_o$ . В представленных результатах ширина отмостки задается отношением  $\eta = L_o / B$ .

На рисунке 3 представлены графики зависимости средних теплопотерь  $q$ , Вт/м, отнесенных к единице длины пола первого этажа, от времени и термического сопротивления утепления отмостки  $R_o$ . В расчетах относительная ширина отмостки составила  $\eta=0,071$ . Время представлено в годах относительно начала отопления здания (октябрь месяц первого года). Из приведенных данных средняя плотность теплового потока на единицу площади (Вт/м<sup>2</sup>) вычисляется делением на расчетную полуширину здания (для данного примера – 7 метров). Десятилетний цикл, показанный на графиках, показывает следующие особенности теплопереноса в рассматриваемом примере:

- периодически повторяющиеся годовые циклы изменения теплопотерь наступают примерно на третий год эксплуатации отопительной системы здания. Причем, утепленная отмостка позволяет сократить этот период примерно на год. Данное обстоятельство может быть учтено при проектировании эксплуатационных характеристик отопительных систем первого этажа;
- утепление отмостки приводит к значительному, примерно на 30%, сокращению теплопотерь в зимнее время и практически не влияет на теплопотери в летнее время;
- требуемая величина термического сопротивления утепления отмостки незначительна и составляет примерно  $R_o \approx 0,5$  °С·м<sup>2</sup>/Вт. Например, при использовании влагостойкого утеплителя с коэффициентом теплопроводности на уровне  $\lambda \approx 0,05$  Вт/(м·°С) его толщина составит 2,5 см. Дальнейшее увеличение  $R_o$  в случае неутепленной плиты по грунту дает малый эффект.

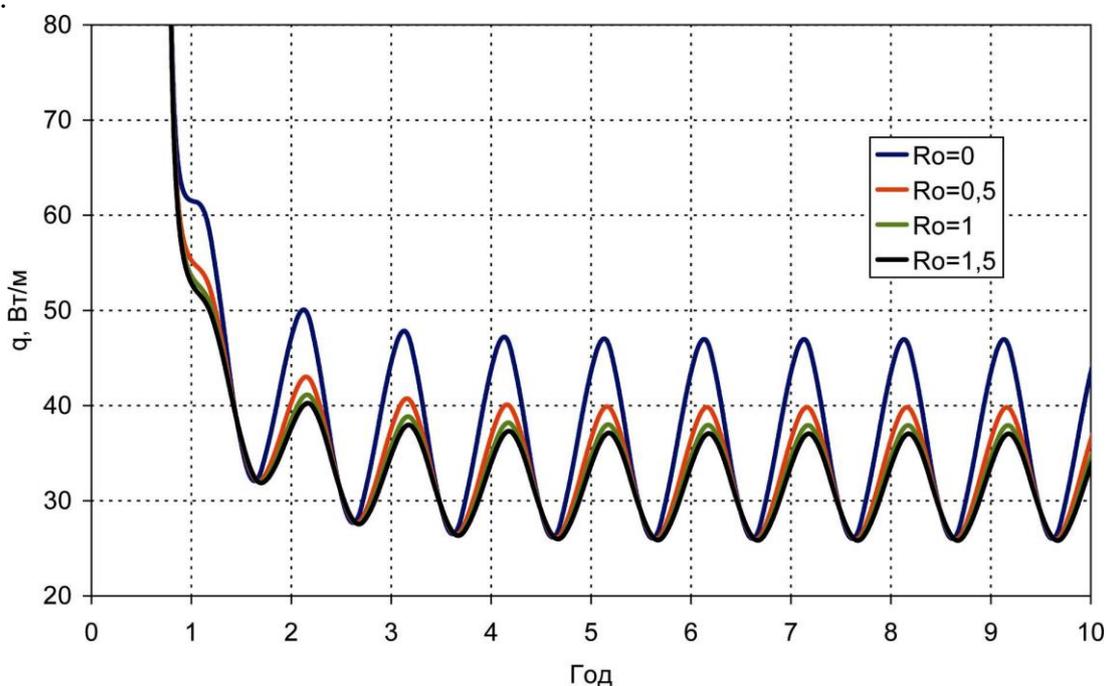


Рисунок 3 – Зависимость средней линейной плотности теплопотерь, отнесенных к единице длины пола здания от времени и термического сопротивления утепления отмостки

Рассмотрим теперь, какую роль в снижении теплопотерь играют геометрические размеры утепленной отмостки, а именно, ее ширина. В качестве критерия эффективности отмостки используем отношение количества тепловой энергии, уходящей на единицу площади пола первого этажа  $U$  (кВт·ч/м<sup>2</sup>) за отопительный период, к ее количеству  $U_0$ , когда утепленная отмостка отсутствует. В графических материалах используется 13-й год после подачи отопления, на который годовые циклы для тепловых потоков внутри основания являются практически повторяющимися (при условии годовой повторяемости температуры наружного воздуха).

На графиках рисунка 4 представлены результаты соответствующих расчетов в зависимости от относительной ширины отмостки  $\eta = L_0 / B$  и для разных величин ее термического сопротивления  $R_0$ .

Из приведенных данных можно сделать вывод, что в рассмотренном случае достаточно эффективной является сравнительно узкая отмостка с шириной, составляющей порядка 5% от ширины здания. В этом случае достигается самое заметное снижение теплопотерь через пол (порядка 15%), причем сам эффект достаточно слабо зависит от термического сопротивления отмостки, и, как это также было показано в примере на рисунке 3, может быть получен при низком термическом сопротивлении на уровне  $R_0 \approx 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$ .

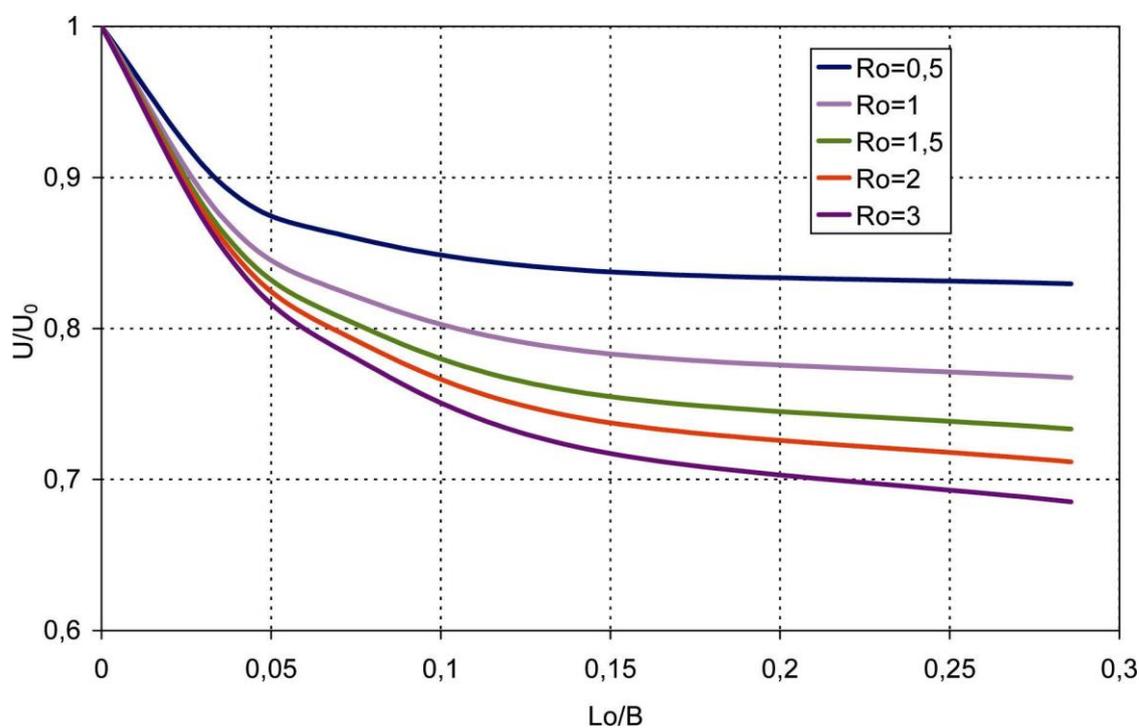


Рисунок 4 – Зависимость теплопотерь в основание за отопительный период от относительной ширины отмостки и термического сопротивления ее утепления

Увеличение ширины отмостки может привести к дальнейшему снижению теплопотерь, но для этого понадобится ее дополнительное утепление, что на практике может быть сопряжено с определенными техническими проблемами.

Рассмотренные тепловые процессы в основании здания при наличии утепленной отмостки явно положительно влияют на сокращение тепловых потерь. При этом возникает вопрос: а, что, если полученные результаты применить не к отмостке, а к естественному утеплению грунта вокруг здания за счет снега, а отмостку не возводить? Теоретически это возможно и в некоторой мере обосновано, тем более, снежный покров может обладать термическими свойствами, близкими к полученным в результате настоящего исследования [20]. Единственным недостатком «естественных» утеплителей является их нестабильность, в т.ч. возможность

полного отсутствия или деградации за счет теплопотуплений. Искусственная отмостка выполняет и другие функциональные назначения, тем более, как показано выше, ее обустройство (геометрические и теплотехнические параметры) не требует существенных затрат.

### Выводы

1. С помощью постановки вычислительных экспериментов показано, что утепленная отмостка вокруг неотапливаемого здания позволяет снизить вероятность образования отрицательных температур грунта под его плитным фундаментом. За счет утепления отмостки могут быть существенно снижены требования к утеплению фундамента.

2. Для отапливаемого здания утепленная отмостка в зимнее время позволяет до 30% снизить текущие тепловые потери в грунтовое основание, эффект достигается и при сравнительно небольшом утеплении отмостки с термическим сопротивлением на уровне  $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$ .

3. В отапливаемом здании с использованием утепленной отмостки тепловые потери в грунт за отопительный период могут быть снижены на величину порядка 15% и более, при этом ширина отмостки может быть сравнительно небольшой, на порядок меньше ширины здания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мачинский В. Д. Теплопередача в строительстве. М. – Л.: Госстройиздат, 1939. 343 с.
2. Власов О.Е. Основы строительной теплотехники. М.: Издание военно-инженерной академии РККА, 1938. 96 с.
3. Сотников А.Г. Теплофизический расчет теплопотерь подземной части зданий // Теплоэнергоэффективные технологии. 2010. № 4. С. 23-28.
4. 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.
5. Hagentoft, C.E. Heat losses and temperature in the ground under a building with and without ground water flow – I. Infinite ground water flow rate // Building and Environment. 1996. Vol. 31. Pp. 3-11.
6. Hagentoft C.E. Heat losses and temperature in the ground under a building with and without ground water flow – II. Finite ground water flow rate // Building and Environment. 1996. Vol. 31. Pp. 13-19.
7. Wang F.S. Mathematical modelling and computer simulation of insulation systems in below grade applications // Proceedings of the ASHRAE/DOE-ORNL conference on the Thermal Performance of Exterior Envelopes of Buildings. 1979. December 3- 5, Orlando, Florida, USA.
8. Walton G.N. Estimating 3-D heat loss from rectangular basements and slabs using 2-D calculations // ASHRAE Transactions. 1987. Vol. 93. Pp. 791-797.
9. Макаревич С.А. Краевые условия и потери теплоты через полы и заглубленные части зданий // "Изв.вузов. Энергетика". Минск: 1990. – С.10.
10. Adjali M.H., Davies M., Rees S.W. and Littler J. Temperatures in and under a slab-on-ground floor: two- and three-dimensional numerical simulations and comparison with experimental data // Building and Environment. 2000. Vol. 35. Pp. 655-662.
11. Janssen H., Carmeliet J., Hens H. The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground // Building and Environment. 2004. Vol. 39. Pp. 825– 836.
12. Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Васильева М.В., Степанов С.П. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги // Матем. Моделирование. 2016. Т. 28, № 10. С. 110–124.
13. Ершов И.О. Методические вопросы расчета сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, находящихся ниже уровня земли // Строительство и реконструкция. 2016. №3(65), С. 109-112.
14. Окунев А.Ю., Левин Е.В. Методы расчета теплопотерь через основания зданий и сооружений // Жилищное строительство. 2016. № 6. С. 25–28.
15. Окунев А.Ю., Левин Е.В., Шагинян К.С. Исследование теплопереноса в основании здания с неотапливаемым подвалом // Строительство и реконструкция. 2017. №3 (71). С. 75–80.
16. СТО 72746455-4.2.1-2013 ООО "ТехноНИКОЛЬ–Строительные Системы" Мелкозаглубленные плитные фундаменты. Проектирование и устройство мелкозаглубленных плитных фундаментов типа "Утепленная шведская плита". – М: 2013. 32 с.
17. 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.

18. Anderson B.R. 1991. Calculation of the steady-state heat transfer through a slab-on-ground floor // *Building and Environment*. 1991. Vol. 26. Pp. 405-415.
19. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Пер. с англ. М. : Мир. 1980. – 616 с.
20. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление // *Лёд и снег*. 2013. №3 (123). С.64-70.

## REFERENCES

1. Machinsky V.D. *Teploperedacha v stroitelstve* [Heat transfer in construction]. Moscow – Leningrad: Gosstroyizdat. 1939. 343 p. (rus)
2. Vlasov O.E. *Osnovy stroitelnoy teplotekhniki* [Basics of building heat engineering]. Moscow: Publication of the Military Engineering Academy of the Red Army. 1938. 96 p. (rus)
3. Sotnikov A.G. *Teplofizicheskiy raschet teplopoter podzemnoy chasti zdaniy* [Thermophysical calculation of heat loss of the underground part of buildings]. *Teploenergoeffektivniye tekhnologii*. 2010. No 4. S. 23-28. (rus)
4. 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.
5. Hagentoft, C.E. Heat losses and temperature in the ground under a building with and without ground water flow – I. Infinite ground water flow rate. *Building and Environment*. 1996. Vol. 31. Pp. 3-11.
6. Hagentoft C.E. Heat losses and temperature in the ground under a building with and without ground water flow – II. Finite ground water flow rate. *Building and Environment*. 1996. Vol. 31. Pp. 13-19.
7. Wang F.S. Mathematical modelling and computer simulation of insulation systems in below grade applications . Proceedings of the ASHRAE/DOE-ORNL conference on the Thermal Performance of Exterior Envelopes of Buildings. 1979. December 3- 5, Orlando, Florida, USA.
8. Walton G.N. Estimating 3-D heat loss from rectangular basements and slabs using 2-D calculations. *ASHRAE Transactions*. 1987. Vol. 93. Pp. 791-797.
9. Makarevich S.A. Kraeviyе usloviya i poteri teploty cherez poly v zaglublenniyе chasty zdaniy [Boundary conditions and heat losses through the floors and buried parts of buildings]. *News of Universities. Energy*. 1990. P.10. (rus)
10. Adjali M.H., Davies M., Rees S.W. and Littler J. Temperatures in and under a slab-on-ground floor: two- and three-dimensional numerical simulations and comparison with experimental data. *Building and Environment*. 2000. Vol. 35. Pp. 655-662.
11. Janssen H., Carmeliet J., Hens H. The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. *Building and Environment*. 2004. Vol. 39. Pp. 825– 836.
12. Vabishevich P.N., Varlamov S.P., Vasil'eva M.V., Stepanov S.P. Chislennoye modelirovaniye temperaturnogo pol'ya mnogoletnemerzlogo gruntovogo osnovaniya zheleznoy dorogi [Numerical simulation of the temperature field of the permafrost soil foundation of the railway]. *Matematicheskoye modelirovaniye*. 2016. №10 (28). Pp. 110-124. (rus)
13. Ershov I.O. Metodicheskie voprosy rascheta soprotivleniya teploperedache ogradhdayischikh konstruktsiy, nakhod'aschikh'sya nizhe urovn'ya zemli [Methodical issues of calculating the resistance to heat transfer enclosing structures that are below ground level]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No 3 (65). S. 109-112. (rus)
14. Okunev A.Yu., Levin E.V. Metody rascheta teplopoter cherez osnovaniya zdaniy i soorizheniy [Methods of calculating heat losses through the bases of buildings and structures]. *Zhilyshnoye stroitel'stvo*. 2016. No 6. Pp. 25-28. (rus)
15. Okunev A.Yu., Levin E.V., Shaginyan K.S. Issledovaniye teploperenosy v osnovanii zdaniya s neotaplivayemym podvalom [Study of heat transfer in the basement of a building with an unheated underground floor]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. No 3 (71). Pp. 75-80. (rus)
16. STO 72746455-4.2.1-2013 «TechnoNICOL – Building Systems» Ltd. Shallow-depth slab foundations. Design and construction of shallow-depth slab foundations of the type "Insulated Swedish slab". Moscow, 2013. 32 p. (rus)
17. 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.
18. Anderson B.R. 1991. Calculation of the steady-state heat transfer through a slab-on-ground floor. *Building and Environment*. 1991. Vol. 26. Pp. 405-415.
19. Roache P. *Vichislitel'naya gidrodinamika* [Computational fluid dynamics]. Transl. from Engl. Moscow: Mir. 1980. 616 p. (rus)
20. Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Chernov R.A. Vliyaniye stratigrafii snezhnogo pokrova na ego termicheskoye soprotivleniye. *Led i sneg*. 2013. No 3 (123). Pp.63-70 (rus)

**Информация об авторах:**

**Левин Евгений Владимирович**

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент, главный научный сотрудник

E-mail: [aqwsrv@list.ru](mailto:aqwsrv@list.ru)

**Окунев Александр Юрьевич**

ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия,  
кандидат физ.-мат. наук

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия,  
главный научный сотрудник, доцент

E-mail: [okunevay@gmail.com](mailto:okunevay@gmail.com)

**Information about authors:**

**Levin Evgeny V.**

Research Institute of Building Physics of RAACS (NIISF RAACS), Moscow, Russia,  
candidate in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher,

E-mail: [aqwsrv@list.ru](mailto:aqwsrv@list.ru)

**Okunev A.Yu.**

candidate in Physical and Mathematical Sciences

Research Institute of Building Physics of RAACS (NIISF RAACS), Moscow, Russia, Chief Researcher,  
FGBOU VO State University of Land Management, Moscow, Russia,

Associate Professor

E-mail: [okunevay@gmail.com](mailto:okunevay@gmail.com)