

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 624.139

**ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ
В ПЛАНЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

**В.П. Мельников, А.А. Мельникова*, Г.В. Аникин*,
К.С. Иванов*, К.А. Спасенникова***

*Тюменский государственный нефтегазовый университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; anikin@ikz.ru

Выполнен стохастический прогноз состояния грунтов под зданием, построенным без свай. Рассмотрены различные прогнозы и три варианта защиты грунта от теплового потока от здания: термическая изоляция пеностеклом на основе диатомита, термическая изоляция пеноплексом и использование сезонных охлаждающих устройств. Показано, что если здание не имеет проветриваемого подполья, то применение сезонных охлаждающих устройств обязательно, иначе рано или поздно грунт оттает. Продемонстрировано повышение энергоэффективности в строительстве путем использования строительных материалов с низким коэффициентом теплопроводности, таких как диатомитовое пеностекло, и сезонных охлаждающих устройств.

Сезонные охлаждающие устройства, грунт, основания, диатомитовое пеностекло, пеноплекс

**ENGINEERING SOLUTIONS FOR BUILDING ON PERMAFROST
IN PERSPECTIVE ENERGY-EFFICIENT ENHANCEMENT**

**V.P. Melnikov, A.A. Melnikova*, G.V. Anikin*,
K.S. Ivanov*, K.A. Spasennikova***

*Tyumen State Oil and Gas University, 625000, Tyumen, Volodarskogo str., 38, Russia
Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, Malygina str., 86, Russia; anikin@ikz.ru

The stochastic forecast of the state of soil under the building without piles is carried out. We have examined different options for the future and the three variants of the soil protection from the heat flux due to the building: the foamed glass on the basis of diatomaceous earth thermal insulation, the penoplex thermal insulation and the use of seasonal cooling devices. It has been demonstrated that if there is no ventilated underground beneath the building, using of the seasonal cooling devices is necessary, otherwise sooner or later the ground will thaw. It has been also revealed that the energy efficiency during the construction can be improved by the use of construction materials with low thermal conductivity, such as foamed diatomite glass and seasonal cooling devices.

Seasonal cooling devices, ground, basements, diatomite, penoplex

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с освоением Арктики и ее природных ресурсов объемы строительства на мерзлоте постоянно увеличиваются. Возникает необходимость анализа различных методов укрепления грунта под объектами, построенными на вечной мерзлоте. Если вопросы строительства на сваях хорошо изучены, то вопросы строительства без свай требуют дополнительного исследования и моделирования. В данной работе моделируется тепловой режим помещения с температурой 20 °С внутри него. При этом рассматриваются

три варианта: 1) под помещением находится термический изолятор из диатомитового пеностекла толщиной 0,45 м; 2) под помещением находится термический изолятор из пеноплекса толщиной 0,45 м; 3) под помещением находится термический изолятор из пеноплекса толщиной 0,45 м и сезонные охлаждающие устройства (СОУ) типа “ГЕТ” (горизонтальная естественно действующая трубчатая система) [Долгих и др., 2008]. Принцип работы этой системы (рис. 1) следующий: когда температура в трубах охлаждающей системы больше,

чем температура в конденсаторе, хладагент в трубах охлаждающей системы, находящийся в грунте, начинает переходить из жидкого состояния в парообразное, поглощая тепло, необходимое для фазового перехода жидкость–пар, из грунта. Образовавшийся пар поднимается в конденсатор, где превращается в жидкость, стекающую затем в трубы охлаждающей системы под действием силы тяжести. При конденсации пара выделяется тепло, которое отдается в атмосферу. Таким образом происходит передача тепла из грунта в атмосферу, т. е. грунт охлаждается. Сезонные охлаждающие устройства работают только зимой, поэтому для предотвращения оттаивания грунта летом между полом здания и трубами охлаждающей системы всегда находится слой термоизоляции.

Охлаждающие устройства являются регуляторами теплооборота, использующими силы природы без применения каких-либо источников энергии, т. е. СОУ являются эффективными устройствами, сберегающими тепловую энергию системы основание–фундамент.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве модели рассмотрим здание, схематично изображенное на рис. 2. Здесь же приведена декартова система координат, в которой производились расчеты. Длина здания составляет 46 м, ширина 24 м, температура в здании 20 °С. Длина расчетной области 100 м, ширина 100 м, глубина ее составляет 10 м. Трубы испарительной системы лежат на глубине 2,1 м от дна сооружения, расстояние между трубами 0,5 м.

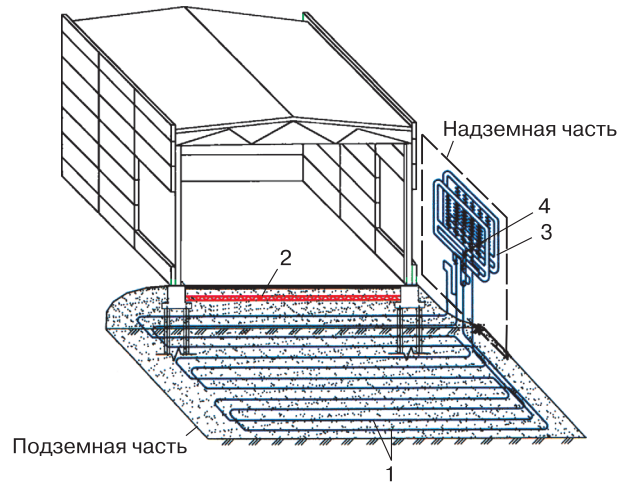
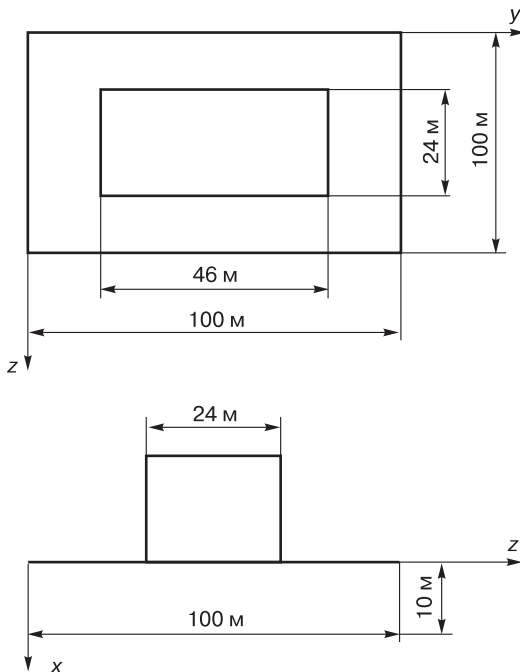


Рис. 1. Общий вид системы “ГЕТ”:

1 – охлаждающие трубы; 2 – теплоизоляция; 3 – конденсаторный блок; 4 – ускоритель циркуляции.

Для расчета тепломассопереноса в грунте применялся метод эффективной теплоемкости, в рамках которого уравнение теплопроводности записывается в следующем виде [Самарский, 2003]:

$$\left[c + L\delta(t - t_f) \right] \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где c – объемная теплоемкость грунта; λ – коэффициент теплопроводности грунта; t – температура; t_f – температура фазового перехода; x, y, z – декар-

Рис. 2. Геометрические характеристики расчетной области в координатных плоскостях (y, z) , (x, y) , (x, z) .

товы координаты; τ – время; $\delta(t - t_f)$ – дельта-функция Дирака. Величина L задается выражением

$$L = r(w - w_{\text{нв}})\gamma_{\text{ск}},$$

где r – удельная теплота плавления льда; w – влажность грунта; $w_{\text{нв}}$ – влажность незамерзшей воды; $\gamma_{\text{ск}}$ – объемная плотность скелета.

Разностная схема, соответствующая уравнению (1), записывается в виде

$$\begin{aligned} t(i, j, k, n+1) = & t(i, j, k, n) + \\ & + \frac{a(i, j, k)h_x}{h_x^2} [t(i+1, j, k, n) + t(i-1, j, k, n) - 2t(i, j, k, n)] + \\ & + \frac{a(i, j, k)h_y}{h_y^2} [t(i, j+1, k, n) + t(i, j-1, k, n) - 2t(i, j, k, n)] + \\ & + \frac{a(i, j, k)h_z}{h_z^2} [t(i, j, k+1, n) + t(i, j, k-1, n) - 2t(i, j, k, n)], \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$a(i, j, k) = \begin{cases} a_{\text{м}}, & t(i, j, k, n) < t_f - \Delta, \\ \frac{0,5(\lambda_{\text{м}} + \lambda_{\text{т}})}{0,5(c_{\text{м}} + c_{\text{т}}) + L/2\Delta}, & t_f - \Delta \leq t(i, j, k, n) \leq t_f + \Delta, \\ a_{\text{т}}, & t(i, j, k, n) > t_f + \Delta. \end{cases}$$

Здесь $a_{\text{т}}$, $a_{\text{м}}$ – теплопроводности талого и мерзлого грунта соответственно; $\lambda_{\text{т}}$, $\lambda_{\text{м}}$ – коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта; $c_{\text{т}}$, $c_{\text{м}}$ – объемные теплоемкости талого и мерзлого грунта. Величина Δ в методе эффективной теплоемкости [Самарский, 2003] определяет диапазон температур, при которых идет фазовый переход, а именно $t_f - \Delta \leq t(i, j, k, n) \leq t_f + \Delta$. При расчете $a(i, j, k)$ дельта-функция Дирака в выражении (1) заменена на функцию $f(t - t_f)$, заданную выражениями [Самарский, 2003]

$$f(t - t_f) = \begin{cases} 0, & |t - t_f| > \Delta, \\ \frac{1}{2\Delta}, & |t - t_f| \leq \Delta. \end{cases}$$

Сетка пространственных и временных координат в расчетной области, а также критерий устойчивости явной разностной схемы, задаются в виде

$$\begin{aligned} x_i &= ih_x, \quad 0 \leq i \leq i_{\text{max}}, \\ y_j &= jh_y, \quad 0 \leq j \leq j_{\text{max}}, \\ z_k &= kh_z, \quad 0 \leq k \leq k_{\text{max}}, \\ \tau_n &= h_\tau n, \quad 0 \leq n \leq n_{\text{max}}, \\ h_\tau &\leq \frac{1}{3a} \left(\frac{1}{h_x^2} + \frac{1}{h_y^2} + \frac{1}{h_z^2} \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Здесь $a = \max(a_{\text{м}}, a_{\text{т}})$; $h_x = 0,1$ м, $h_y = 0,1$ м, $h_z = 1$ м – величины шагов по координатам x , y , z соответственно; $h_\tau = 0,01$ сут – шаг по времени; $i_{\text{max}} = 101$, $j_{\text{max}} = 1001$, $k_{\text{max}} = 99$ – максимальные значения i, j, k , определяющие размеры расчетной области; n_{max} задает момент времени, в который определяется температурное поле.

Тепловое взаимодействие поверхности грунта с атмосферой главным образом зависит от теплового воздействия радиации и конвективного теплообмена. Тепловой поток, задающий воздействие радиации на поверхность грунта или снега, определяется выражением [Павлов, 1984]

$$q_r = R(1 - A) - \epsilon \sigma T_s^4 (1 - p),$$

где q_r – радиационный тепловой поток; R – прямая солнечная радиация; A – альbedo; σ – постоянная Стефана–Больцмана; T_s – температура поверхности земли; K ; p – доля инфракрасного излучения, излученного поверхностью и отраженного атмосферой назад к поверхности земли; ϵ – коэффициент серости поверхности.

Согласно [Павлов, 1984], коэффициент серости можно принимать близким к единице, а величина p в среднем по планете равна 0,84 [Trenberth et al., 2009]. Данная величина в нашем конкретном случае неизвестна, однако вклад от нее в общий тепловой поток не является определяющим, поэтому для расчетов можно использовать среднее по планете значение.

Конвективный тепловой поток от атмосферы к грунту или снегу задается следующим выражением [Foken, 2008]:

$$q_c = \frac{\rho c_p (\alpha_0 \kappa)^2 v(z) (t(z) - t(0))}{(\ln(z/z_0))^2}. \quad (3)$$

Здесь q_c – тепловой поток, обусловленный конвекцией; ρ – плотность воздуха; c_p – удельная теплоемкость воздуха; $\alpha_0 = 1,25$; $\kappa = 1,4$ – постоянная Кармана; $v(z)$ – скорость воздуха на высоте z от поверхности; $t(z)$ – температура на высоте z ; $t(0)$ – температура на поверхности.

Обычно температуру измеряют на высоте около 2 м, а скорость ветра на высоте 10 м. Для того чтобы получить окончательное выражение, учтем, что выполняется соотношение [Foken, 2008]

$$v(z) = v(10) \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(10/z_0)}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получаем окончательное выражение для конвективного теплового потока

$$q_c = \frac{\rho c_p (\alpha_0 \kappa)^2 v(10) (t(z) - t(0))}{\ln(z/z_0) \ln(10/z_0)},$$

где z – высота, на которой измеряется температура атмосферы на метеостанции; z_0 – параметр, который

учитывает неровность поверхности. Чем больше неровность поверхности, тем больше z_0 . Для гладкого покрытия, такого как снег, имеем $z_0 = 0,001$ м, $A = 0,75$ [Павлов, 1984], для грунта $z_0 = 0,02$ м, $A = 0,25$.

Значения прямой солнечной радиации взяты из работы [Павлов, 1984]:

Месяц	I	II	III	IV	V	VI
R, Вт/м ²	0	16	74	171	205	237
Месяц	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R, Вт/м ²	224	129	60	22	3	0

Граничные условия на поверхности грунта записываются в виде

$$q_r + q_c = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x},$$

где λ – теплопроводность материала, граничащего с воздухом (снег или просто грунт); x – глубина.

На рис. 3 представлена схема граничных условий в расчетной области.

На боковых поверхностях расчетной области берется граничное условие $q_n = 0$ (q_n – тепловой поток, перпендикулярный боковой поверхности расчетной области). На нижней границе расчетной области задается граничное условие первого рода. Сетка координат подбирается всегда таким образом, чтобы узлы решетки проходили через трубы охлаждающей системы (они считаются линейными источниками холода). Несложно вычислить, что тепловой поток, входящий в узел, через который проходит труба испарительной системы, и имеющий по координатам x, y, z номера i, j, k соответственно, задается выражением

$$U_{i,j,k} = \frac{\lambda_{гр} h_x h_z}{h_y} (t_{i,j+1,k} + t_{i,j-1,k} - 2t_n) + \frac{\lambda_{гр} h_y h_z}{h_x} (t_{i+1,j,k} + t_{i-1,j,k} - 2t_n),$$

где $\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта; t_n – температура трубы испарителя.

Тепловой обмен между испарительной системой СОУ и атмосферой задается граничным условием

$$\sum_{i,j,k \in M} U_{i,j,k} = S_{кон} N_{кон} \eta_{эф} (t_k - t_a) \alpha,$$

где M – множество узлов вычислительной сетки, через которые проходят трубы системы; $S_{кон}$ – площадь одного конденсатора; $N_{кон}$ – количество конденсаторов; $\eta_{эф}$ – коэффициент эффективности ребер; t_k – температура конденсатора; t_a – температура атмосферы; α – коэффициент теплоотдачи конденсатора.

Согласно [Аникин и др., 2011], температура конденсатора может быть определена, если известна температура испарителя, которая, в свою

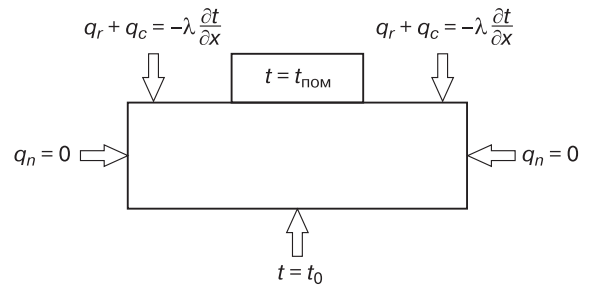


Рис. 3. Схема граничных условий в расчетной области.

очередь, равна температуре грунта на границе с трубой испарителя:

$$t_k = t_n - \frac{0,5 \rho_x g H}{dp_{нас}/dt},$$

где ρ_x – плотность хладагента; g – ускорение свободного падения; H – высота подъема конденсатора над испарителем; $dp_{нас}/dt$ – производная от давления насыщенных паров по температуре. Изложенная методика расчета ранее сопоставлялась с термометрическими данными и было получено хорошее согласие [Долгих и др., 2013]. При моделировании теплообмена будем учитывать вероятностный характер метеорологических характеристик. Впервые вероятностные методы для анализа фундаментов сооружений были применены в работе [Хрусталев и др., 1988].

МЕТОД СТОХАСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

При составлении многолетнего прогноза состояния грунтов обычно используются среднемесячные данные по температуре воздуха, скорости ветра и толщине снежного покрова для каждого месяца, которые повторяются из года в год. При этом получается только один вариант будущего и только один прогноз. Для получения же прогноза, учитывающего все многообразие возможных вариантов будущего, был предложен метод стохастического прогнозирования [Аникин и др., 2013]. Метод заключается в том, что среднемесячные значения температуры воздуха, скорости ветра и толщины снежного покрова для каждого года генерируются с помощью генераторов случайных чисел на основании распределений вероятностей этих величин, полученных по архивным данным метеостанций. При этом на одну и ту же дату получается большое количество прогнозируемых трехмерных температурных полей под сооружением, каждое из которых соответствует одному из вариантов будущего. Вся совокупность этих температурных полей и дает полную картину о многообразии возможных вариантов состояния грунтов.

По метеорологическим данным метеостанции Игарка были получены распределения вероятности по температуре и скорости ветра. Оказалось, что распределение вероятности по температурам хорошо описывается нормальным распределением:

$$dw(t) = \frac{\exp\left[-(t-\bar{t})^2/2\sigma^2\right] dt}{\sqrt{2\pi}\sigma},$$

где t – температура; \bar{t} – математическое ожидание; σ – среднеквадратичное отклонение. Распределение вероятности по скорости ветра описывается гамма-распределением:

$$dw(v) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} v^{\alpha-1} e^{-\lambda v} dv,$$

где v – скорость ветра; $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция; α и λ связаны со средним значением скорости ветра \bar{v} и дисперсией D следующими соотношениями:

$$\bar{v} = \alpha/\lambda, \quad D = \alpha/\lambda^2.$$

Сравнения распределений, полученных по архивным данным метеостанции Игарка, с аналогичными распределениями, полученными с помощью генераторов случайных чисел программы MathCAD-14, для июня и января приведены на рис. 4. Аналогичные графики были получены авторами и для других месяцев года, однако они не приведены из-за ограниченности объема статьи. На всех графиках архивные данные достаточно хорошо согласуются с данными, полученными с помощью генераторов случайных чисел путем моделирования распределений вероятности с параметрами, приведенными в таблице.

Что касается толщины снежного покрова, то ввиду небольшого объема выборки по архивным данным не удалось получить гладкого распределения, поэтому толщина снежного покрова моделировалась с помощью нормального распределения с математическим ожиданием \bar{h} и среднеквадра-

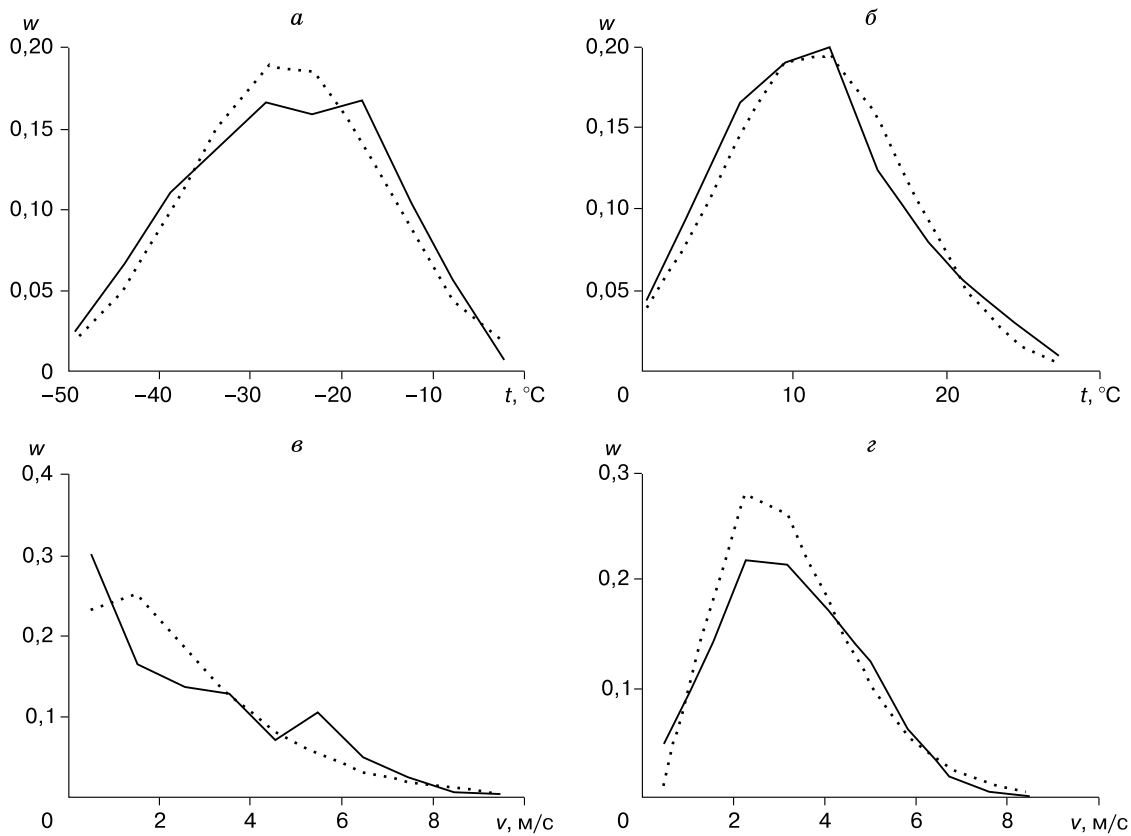


Рис. 4. Сравнение распределений температур и скоростей ветра для июня и января, полученных по архивным данным метеостанции Игарка за 2007–2012 гг., с аналогичными распределениями, полученными с помощью генераторов случайных чисел программы MathCAD-14.

а: сплошная линия – распределение температур в январе, пунктирная – нормальное распределение с $\sigma = 10,768$ °C, $\bar{t} = -26,225$ °C, полученное с помощью генератора случайных чисел; б: сплошная линия – распределение температур в июне, пунктирная – нормальное распределение с $\sigma = 5,99$ °C, $\bar{t} = 11,22$ °C, полученное с помощью генератора случайных чисел; в: сплошная линия – распределение скоростей ветра в январе, пунктирная – гамма-распределение с $\alpha = 1,606$, $\lambda = 0,588$, полученное с помощью генератора случайных чисел; г – сплошная линия – распределение скоростей ветра в июне, пунктирная – гамма-распределение с $\alpha = 4,536$, $\lambda = 1,392$, полученное с помощью генератора случайных чисел.

Параметры распределений температуры, скорости ветра и толщины снежного покрова для каждого месяца

Параметр	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
\bar{t} , °C	-26,20	-27,0	-17,30	-8,12	-0,66	11,20	15,80	11,30	6,60	-4,20	-19,10	-24,40
σ , °C	10,80	9,88	10,20	9,24	6,34	5,99	5,18	4,41	4,86	7,29	11,13	11,40
α	1,61	1,54	1,91	2,40	3,66	4,54	2,15	2,68	2,77	2,84	1,58	2,18
λ , с/м	0,59	0,60	0,64	0,75	1,06	1,39	0,91	0,94	0,88	0,87	0,59	0,70
\bar{h} , м	0,70	0,79	0,86	0,79	0,48	0	0	0	0	0,12	0,35	0,53
σ_h , м	0,21	0,19	0,19	0,20	0,22	0	0	0	0	0,10	0,13	0,17

тичным отклонением σ_h , заданными следующими формулами:

$$\bar{h} = \sum_i \frac{h_i}{N}, \quad \sigma_h = \sqrt{\sum_i \frac{(h_i - \bar{h})^2}{N}}$$

Здесь h_i – конкретное значение толщины снежного покрова в выборке для данного месяца; N – объем выборки для данного месяца. Суммирование проводится по всему объему выборки. Значения \bar{h} и

σ_h для каждого месяца приведены в таблице. В летние месяцы и в сентябре, когда снежный покров отсутствовал, принималось $\bar{h} = 0$, $\sigma_h = 0$.

СРАВНЕНИЕ ТРЕХ ВАРИАНТОВ ЗАЩИТЫ ГРУНТА

Расчет выполнен на суперкомпьютере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра. С помощью метода Монте-Карло было разыграно 48 различных вариантов будущего, значения

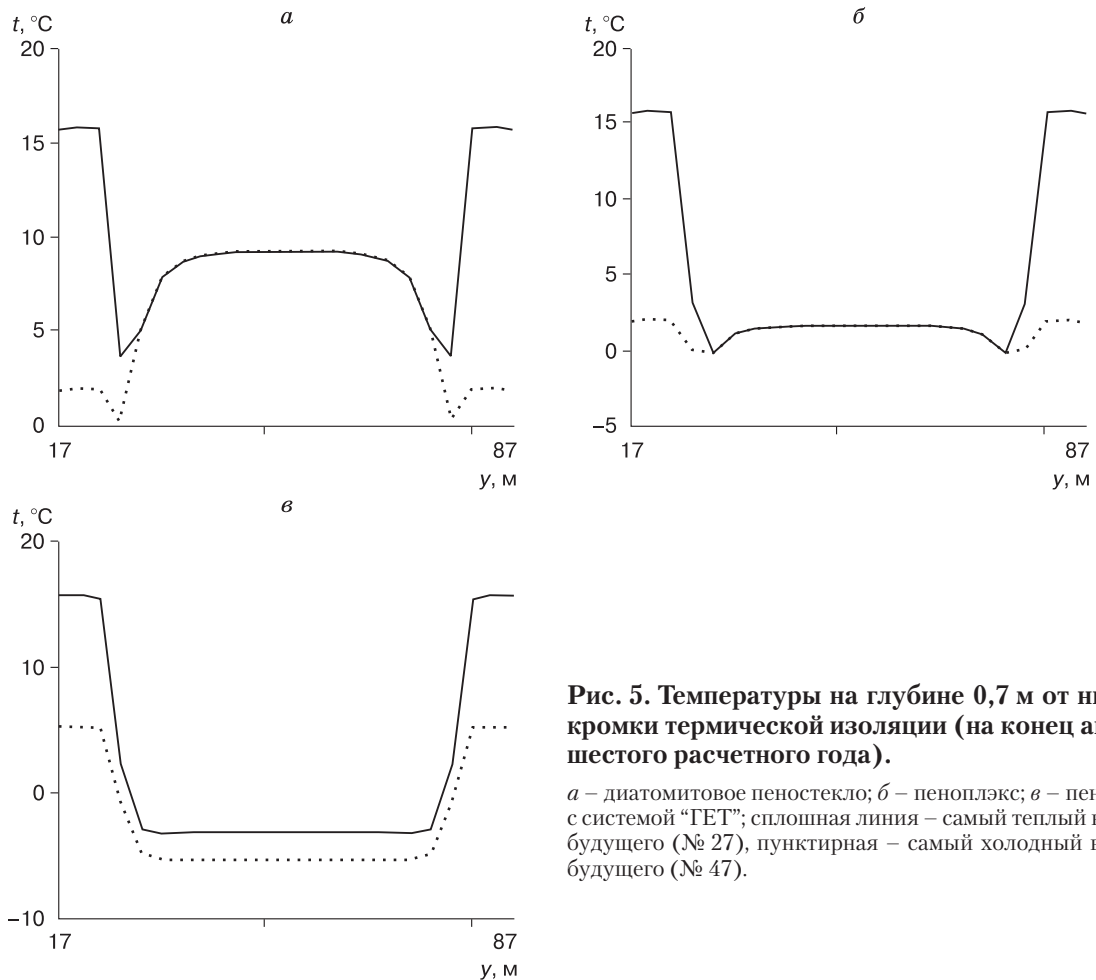


Рис. 5. Температуры на глубине 0,7 м от нижней кромки термической изоляции (на конец августа шестого расчетного года).

а – диатомитовое пеностекло; б – пеноплекс; в – пеноплекс с системой “ГЕТ”; сплошная линия – самый теплый вариант будущего (№ 27), пунктирная – самый холодный вариант будущего (№ 47).

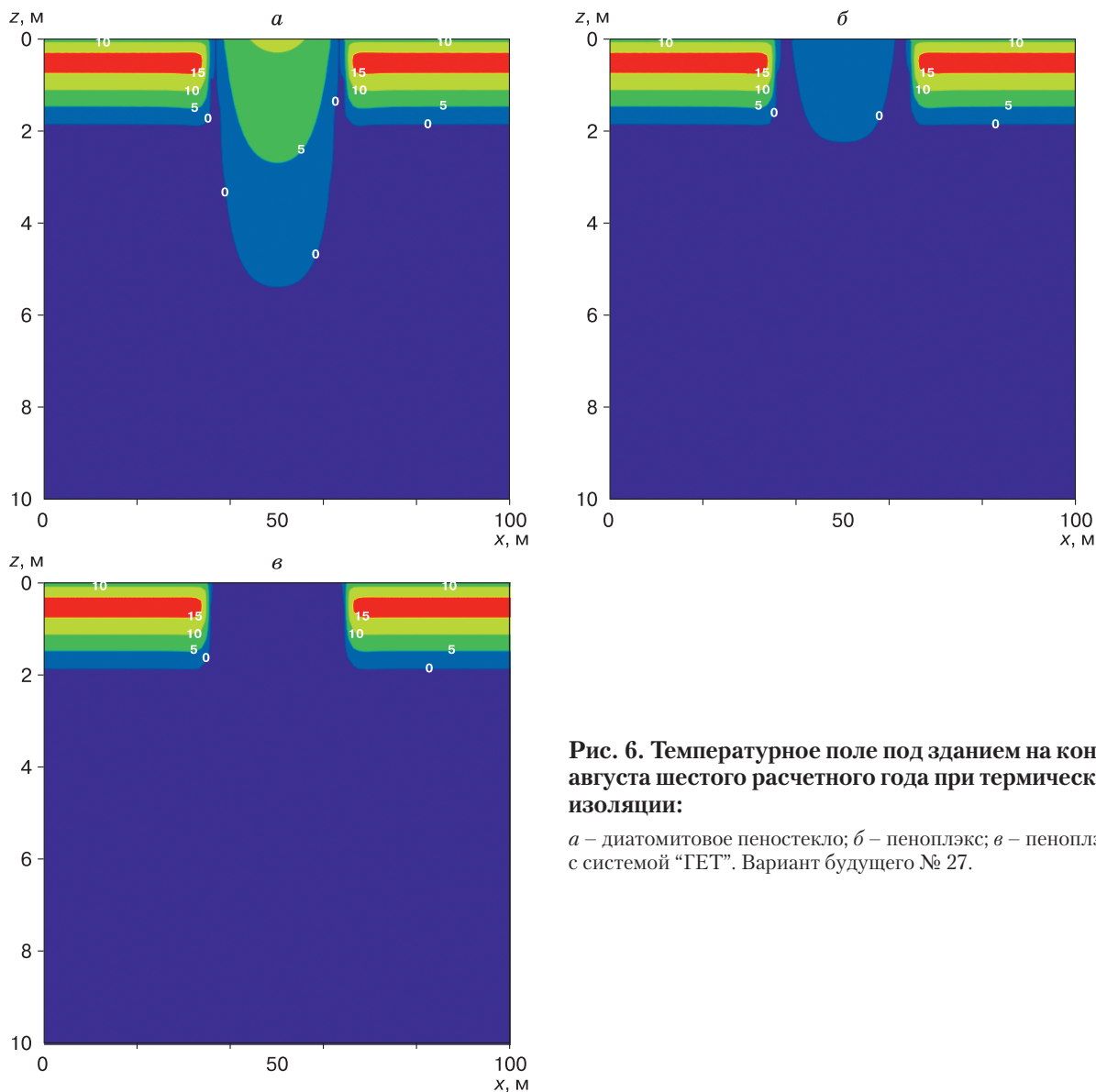


Рис. 6. Температурное поле под зданием на конец августа шестого расчетного года при термической изоляции:

a – диатомитовое пеностекло; *б* – пеноплэкс; *в* – пеноплэкс с системой “ГЕТ”. Вариант будущего № 27.

солнечной радиации R приведены выше, а среднемесячные значения скорости ветра и температуры воздуха генерировались генератором случайных чисел программы MathCAD-14. Расчет проводился на протяжении 6 лет с начала сентября (имеется в виду месяц абстрактного года). В расчетах принималось $\lambda_m = 2$ Вт/(м·К), $\lambda_T = 1,4$ Вт/(м·К), $c_m = 2390$ кДж/(м³·К), $c_T = 3010$ кДж/(м³·К), $w = 0,25$, $\gamma_{ск} = 1620$ кг/м³. На рис. 5 приведены температуры на глубине 0,7 м от нижней кромки термического изолятора с наибольшей и наименьшей средней температурой на линии на конец августа шестого расчетного года. Как следует из рис. 5, в случаях отсутствия СОУ температура под зданием практически не зависит от погодных условий и полностью определяется тепловым потоком от здания.

На рис. 6 приведены температурные поля под зданием для каждого из рассмотренных нами случаев на конец августа шестого расчетного года. Как видно на рис. 6, *а, б*, в случае термического изолятора из диатомитового пеностекла грунт протаивает на глубину до 6 м, в случае термического изолятора из пеноплэкса грунт протаивает на глубину до 2 м.

Диатомитовое пеностекло представляет собой пористый неорганический материал, получаемый вспениванием силикатных композиций на основе осадочных горных пород – диатомитов, при 750–850 °С. Диатомиты являются широко распространенным сырьем, их месторождения встречаются во всем мире. Например, имеющие выходы на поверхность запасы диатомитов Ямала насчитывают сотни миллиардов кубометров.

Применение диатомитового пеностекла с коэффициентом теплопроводности 0,10–0,15 Вт/(м·К) для теплоизоляции оснований инженерных сооружений может быть перспективным по следующим причинам:

- увеличение сжимающей нагрузки вплоть до 50 кгс/см² не приводит к деформации материала;
- материал имеет замкнутую пористость и не впитывает влагу, работая в основании, а следовательно, не теряет теплоизоляционных свойств;
- в отличие от традиционных пенопластов диатомитовое пеностекло является негорючим материалом (температура применения вплоть до 550 °С), имеющим гораздо более длительный срок службы.

Возможность получения на основе диатомитового пеностекла различных изделий (плит, скорлуп, блоков для кладки стен, гранул окатанной формы и др.) существенно расширяет область его применения.

Необходимо, однако, понимать, что при защите мерзлоты только с помощью термоизоляции рано или поздно грунт протает на любую глубину. Только защита мерзлоты с помощью СОУ позволяет избежать оттаивания грунта. Таким образом, как следует из рис. 6, а, б, термическая изоляция без СОУ не имеет смысла. Как видно на рис. 6, в, при использовании СОУ грунт не оттаивает вообще. На рис. 5 приведены температуры на глубине 0,7 м ниже кромок термической изоляции. Как следует из рис. 5, а, б, если СОУ не работают, температура под зданием не зависит от метеорологических характеристик и определяется только тепловым потоком от здания и термической изоляцией. В случае наличия СОУ температура под зданием зависит от флуктуаций атмосферных характеристик, поскольку конденсаторы СОУ обмениваются с атмосферой теплом (см. рис. 5, в).

Вычислим теперь утечки тепла через боковые стены здания. Полный годовой поток тепла через боковые стены

$$Q = \lambda_{\text{ст}} (t_{\text{пом}} - t_a) \frac{S}{h},$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности стен; $t_{\text{пом}}$ – температура в помещении; t_a – температура атмосферы; S – площадь стен; h – толщина стен. Полагая, что здание имеет высоту 10 м, а площадь окон 20 % от общей площади боковых стен, получим: для стен из диатомитового пеностекла $Q = 9,6$ кВт при $\lambda_{\text{ст}} = 0,15$ Вт/(м·К); для стен из кирпича $Q = 44,8$ кВт при $\lambda_{\text{ст}} = 0,7$ Вт/(м·К).

Это среднегодовой поток тепла через боковые стены, усредненный по всем вариантам будущего, поскольку в процессе численного эксперимента получено среднегодовое и усредненное по всем вариантам значение $(t_{\text{пом}} - t_a) = 28,56$ К. Таким образом, экономия для стен с применением диатомитового пеностекла многократная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного стохастического прогноза показано, что температурное поле под сооружением в случае отсутствия СОУ не зависит от флуктуаций температуры воздуха, скорости ветра и толщины снежного покрова (см. рис. 5, а, б). Это означает, что боковые потоки тепла несущественны, поэтому нет необходимости при расчетах с большой точностью учитывать все вклады в тепловой поток на границе воздуха и грунта достаточно грубых оценок. Вывод о том, что модель теплообмена на границе воздуха и грунта не оказывает существенного влияния на температурное поле под сооружением и носит вспомогательный характер, для сооружений достаточно большого размера может быть полезна при проектных расчетах с помощью любых компьютерных программ. Показано, что при отсутствии СОУ за 6 лет грунт протаивает на 6 м (см. рис. 6, а), при наличии СОУ грунт вообще не протаивает (см. рис. 6, в). Следовательно, если объект строится без вентилируемого подполья, наличие СОУ обязательно. В настоящее время различные объекты строятся без использования СОУ, например, нефтепроводы и газопроводы, которые зачастую прокладывают в мерзлом грунте, при этом считается, что одна только термоизоляция способна предотвратить оттаивание грунта. Это и приводит к печальным последствиям: газопроводы всплывают, нефтепроводы рвутся, построенные таким способом здания проваливаются.

Использование же СОУ в сочетании с хорошей термоизоляцией даже в конце летнего сезона сохраняет грунт в мерзлом состоянии (см. рис. 6, в).

По сравнению с холодильными машинами использование СОУ делает эксплуатацию сооружений, построенных на вечной мерзлоте, гораздо более энергоэффективной, поскольку не требует затрат электрической энергии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 14-17-000131).

Литература

- Аникин Г.В., Плотников С.Н., Вакулин А.А., Спасенникова К.А. Стохастическое прогнозирование состояния грунтов под объектами, построенными на вечной мерзлоте // Вестн. Тюм. ун-та, 2013, № 7, с. 46–53.
- Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование теплопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 33–39.
- Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений // Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, ООО НПО “ФСА”, 2008, с. 34–39.

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Численный расчет нестационарных температурных полей в системе “резервуар с нефтью–сезонное охлаждающее устройство” // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 70–75.

Павлов А.В. Энергообмен в ландшафтной сфере Земли / А.В. Павлов. Новосибирск, Наука, 1984, 256 с.

Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.

Хрусталеv Л.Н. Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий и сооружений в криолитозоне / Л.Н. Хрусталеv, Г.П. Пустовойт. М., Наука, 1988, 249 с.

Foken T. Micrometeorology / T. Foken. Berlin etc., Springer, 2008, 306 p.

Trenberth K.E., Fasullo J.T., Kienl J. Earth's global energy budget // Amer. Meteorol. Soc., 2009, March, p. 311–323.

*Поступила в редакцию
25 марта 2014 г.*