

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 624.139

СТАЦИОНАРНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В СИСТЕМЕ
“ЕМКОСТЬ С НЕФТЬЮ – ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРЫ ГРУНТА”

Г.В. Аникин, С.Н. Плотников, К.А. Спасенникова

Институт криосферы Земли СО РАН,
625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, anikin@ikz.ru, plotnikov59@yandex.ru

Получены аналитические выражения для расчета температурных полей системы термостабилизаторов, установленных под резервуаром с нефтью. Показано, что данные выражения позволяют рассчитать все необходимые характеристики процесса термостабилизации фундамента под резервуаром с нефтью.

Термостабилизатор, резервуар, нефть, фундамент, моделирование

STATIONARY TEMPERATURE FIELDS IN SYSTEM
“TANK WITH OIL – THERMOSTABILIZERS OF THE GROUND”

G.V. Anikin, S.N. Plotnikov, K.A. Spasennikova

Earth Cryosphere Institute, SB RAS,
625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, anikin@ikz.ru, plotnikov59@yandex.ru

Analytical expressions for calculation of temperature fields of the system of thermostabilizers installed under the oil tank have been obtained. It has been demonstrated that the expressions allow to one calculate all necessary characteristics of the oil tank foundation thermostabilization process.

Thermostabilizer, tank, oil, foundation, modeling

Природные богатства северных и восточных районов России приобретают все большее значение, поэтому перспективные планы экономического и социального развития страны предусматривают интенсивное освоение огромных малонаселенных пространств, лежащих к востоку от Урала, необжитых районов. Это порождает новые проблемы, связанные со строительством инженерных сооружений на вечномёрзлых грунтах в районах с суровыми климатическими условиями.

Районы распространения вечномёрзлых грунтов занимают 65 % территории России, и разработка эффективных методов строительства в специфических условиях этих районов очень важна. С точки зрения уменьшения себестоимости добычи и транспортировки нефти особое значение приобретает строительство нефтяных резервуаров большой емкости (10 000–100 000 м³) вблизи эксплуатируемых нефтяных месторождений.

Как следует из работы [Аникин, Спасенникова, 2009], температурное поле системы охлаждения в точке с координатами (x, y, z) записывается следующим образом:

$$\omega(x, y, z) = \frac{\omega_n - \omega_\infty}{\Psi} \Theta(x, y, z) + \sum_{n=1}^N M_n(x, y, z) X_n + \sum_{n=1}^N N_n(x, y, z) Y_n + \omega_\infty, \quad (1)$$

где ω_∞ – температура на бесконечности; ω_n – температура нефти в емкости;

$$\Theta(x, y, z) = \int_0^\infty J_0\left(\zeta \frac{r}{R_0}\right) \frac{J_1(\zeta)}{\zeta} \exp\left(-\zeta \frac{x}{R_0}\right) d\zeta, \quad (2)$$

где $J_0(x)$, $J_1(x)$ – функции Бесселя; R_0 – радиус емкости с нефтью; $r = \sqrt{y^2 + z^2}$.

Величина Ψ задается соотношением

$$\Psi = 1 + \frac{\lambda_{\text{гп}}}{R_0} \sum_k \frac{l_k}{\lambda_k}, \quad (3)$$

где l_k , λ_k – толщина и коэффициент теплопроводности материала, обозначенного номером k и разделяющего нефть и грунт; $\lambda_{\text{гп}}$ – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта.

Из уравнения (1) следует, что

$$M_n(x, y, z) = \sum_{n=1}^N \left(f(\xi_n) + f(\xi_n^*) \right) - \frac{\Theta(x, y, z)}{\Psi} \sum_{n=1}^N \left(f(\xi_n^0) + f(\xi_n^{0*}) \right); \quad (4)$$

$$N_n(x, y, z) = \sum_{n=1}^N \left(g(\eta_n, \xi_n) + g(\eta_n^*, \xi_n^*) \right) - \Theta(x, y, z) \Psi^{-1} \sum_{n=1}^N \left(g(\eta_n^0, \xi_n^0) + g(\eta_n^{0*}, \xi_n^{0*}) \right), \quad (5)$$

где функции $f(\xi)$ и $g(\eta, \xi)$ задаются выражениями

$$f(\xi) = \ln \left(\frac{\xi+1}{\xi-1} \right); \quad (6)$$

$$g(\eta, \xi) = (3\eta^2 - 1) \left(\left(0,5(\xi^2 - 1) + \frac{1}{3} \right) \ln \left(\frac{\xi+1}{\xi-1} \right) - \xi \right) = (3\eta^2 - 1) \left(\left(0,5 \left(\xi^2 - \frac{1}{3} \right) \right) \ln \left(\frac{\xi+1}{\xi-1} \right) - \xi \right); \quad (7)$$

$$\eta_n^2(x, y, z) = \frac{1 + \tilde{r}_n^2 + \tilde{z}_n^2}{2} - \sqrt{\frac{(1 + \tilde{r}_n^2 + \tilde{z}_n^2)^2}{4} - \tilde{z}_n^2}; \quad (8)$$

$$\xi_n^2(x, y, z) = \frac{1 + \tilde{r}_n^2 + \tilde{z}_n^2}{2} + \sqrt{\frac{(1 + \tilde{r}_n^2 + \tilde{z}_n^2)^2}{4} - \tilde{z}_n^2}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (\eta_n^*(x, y, z))^2 &= \\ &= \frac{1 + (\tilde{r}_n^*)^2 + \tilde{z}_n^2}{2} - \sqrt{\frac{(1 + (\tilde{r}_n^*)^2 + \tilde{z}_n^2)^2}{4} - \tilde{z}_n^2}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\xi_n^*(x, y, z))^2 &= \\ &= \frac{1 + (\tilde{r}_n^*)^2 + \tilde{z}_n^2}{2} + \sqrt{\frac{(1 + (\tilde{r}_n^*)^2 + \tilde{z}_n^2)^2}{4} - \tilde{z}_n^2}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\tilde{r}_n^* = \frac{2}{L_n} \sqrt{(x + x_n)^2 + (y - y_n)^2},$$

$$\tilde{z}_n = \frac{2z}{L_n} \tilde{r}_n = \frac{2}{L_n} \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2},$$

$$\tilde{r}_n = \frac{2}{L_n} \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2},$$

$$\begin{aligned} \xi_n^0 &= \xi_n(0, 0, 0), & \xi_n^{0*} &= \xi_n^*(0, 0, 0), \\ \eta_n^0 &= \eta_n(0, 0, 0), & \eta_n^{0*} &= \eta_n^*(0, 0, 0), \end{aligned} \quad (12)$$

x_n, y_n – координаты трубы с номером n охлаждающего устройства (трубы проложены параллельно оси z); L_n – длина трубы.

Величины X_n и Y_n , входящие в уравнение (1), как следует из работы [Аникин, Спасенникова, 2009], определяются путем решения системы линейных уравнений:

$$\sum_{j=1}^{2N} A_{ij} Z_j = B_i, \quad 1 \leq i \leq 2N, \quad (13)$$

где

$$X_j = Z_j \text{ при } 1 \leq j \leq N \text{ и } Y_{j-N} = Z_j \text{ при } N+1 \leq j \leq 2N;$$

$$B_i = w_a + \Omega_1 - \frac{w_H - w_\infty}{\Psi} \Theta(x_i, y_i, 0), \quad 1 \leq i \leq N,$$

$$B_i = w_a + \Omega_1 - \frac{w_H - w_\infty}{\Psi} \Theta \left(x_{i-N}, y_{i-N}, \frac{L_{i-N}}{2} \right),$$

$$N+1 \leq i \leq 2N,$$

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \frac{0,5\rho_L gH}{dP_{\text{нас}}/dw} \left(1 - \frac{0,5\rho_L gH}{dP_{\text{нас}}/dw} \varphi \right)^{-1} \varphi = \\ &= \frac{d^2 P_{\text{нас}}/dw^2}{dP_{\text{нас}}/dw} - \frac{1}{\rho_L} \frac{d\rho_L}{dw}, \end{aligned} \quad (14)$$

где w_a – температура атмосферы; ρ_L – плотность жидкого хладагента; g – ускорение свободного падения; H – превышение уровня жидкости в конденсаторе над уровнем жидкости в испарителе для системы “ГЕТ” [Долгих и др., 2008]; $H = 0$ для системы слабонаклонных термостабилизаторов

[Там же]; $\frac{dP_{\text{нас}}(w)}{dw}$ – производная по температуре от функции, задающей зависимость давления насыщенных паров хладагента от температуры; $\frac{d^2 P_{\text{нас}}(w)}{dw^2}$ – вторая производная этой функции; $\frac{d\rho_L}{dw}$ – производная плотности жидкого хладагента по температуре на кривой насыщения.

Далее запишем выражения

$$A_{ij} = M_{ij} + \Omega_0 K_{ij} L_j \text{ при } 1 \leq i \leq N, \quad 1 \leq j \leq N,$$

$$A_{ij} = N_{ij} \text{ при } 1 \leq i \leq N, \quad N+1 \leq j \leq 2N,$$

$$A_{ij} = \tilde{M}_{ij} + \Omega_0 K_{ij} L_j \text{ при } N+1 \leq i \leq 2N, \quad 1 \leq j \leq N,$$

где

$$\Omega_0 = 4\pi R_k \lambda_{\text{тр}} \left(1 - \frac{0,5\rho_L gH}{dP_{\text{нас}}/dw} \varphi \right)^{-1}, \quad (15)$$

R_k – термосопротивление конденсатора; $K_{ij} = 1$, если i и j – номера труб, связанных с одним и тем же конденсатором; $K_{ij} = 0$, если i и j – номера труб, связанных с разными конденсаторами;

$$A_{ij} = \tilde{N}_{ij} \text{ при } N+1 \leq i \leq 2N, \quad N+1 \leq j \leq 2N,$$

$$A_{ij} = N_{ij} \text{ при } 1 \leq i \leq N, \quad N+1 \leq j \leq 2N;$$

$$M_{ij} = M_j(x_i, y_i, 0), \quad N_{ij} = N_j(x_i, y_i, 0); \quad (16)$$

$$\tilde{M}_{ij} = M_j\left(x_i, y_i, \frac{L_i}{2}\right), \quad \tilde{N}_{ij} = N_j\left(x_i, y_i, \frac{L_i}{2}\right). \quad (17)$$

Приведем расчет системы слабонаклонных термостабилизаторов производства ФГУП «Фундаментпроект» под нефтяным резервуаром емкостью 50 000 м (РВС 50000), установленным на Варандейском месторождении [Андреев и др., 2006].

Нефтяной резервуар на месторождении представляет собой бочку с внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 60,7$ м и внешним диаметром $d_{\text{внеш}} = 66,07$ м. Между внутренней и внешней стенками резервуара содержится воздух для предотвращения боковых тепловых потоков. Нефть в емкости имеет температуру 45°C . Под резервуаром находится слой насыпного грунта толщиной $l_1 = 0,6$ м с коэффициентом теплопроводности $\lambda_1 = 0,95 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$, под этим слоем, в свою очередь, слой термоизолятора толщиной $l_2 = 0,4$ м с коэффициентом теплопроводности $\lambda_2 = 0,04 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$, под термоизолятором находится насыпной слой песка, замороженный первоначально с помощью холодильных машин и имеющий толщину $l_3 = 3$ м и коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{гр}} = 1,73 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$. В данном слое песка на расстоянии $l_x = 1,25$ м от нижней кромки термоизолятора, параллельно друг к другу расположены

испарители термосифонов с шагом $l_y = 1$ м. Общий вид расположения термосифонов в трех проекциях представлен на рис. 1. Испарители термосифонов наклонены к горизонтали на $1-2^\circ$, поэтому их с хорошей точностью можно считать горизонтальными.

Решение уравнения теплопроводности спустя некоторое время τ_0 при неизменных граничных условиях стремится к решению уравнения

$$\Delta t = 0,$$

где t – температура; Δ – оператор Лапласа. При этом время τ_0 равно

$$\tau_0 = \frac{L^2}{a}, \quad (18)$$

где L – характерный размер; a – температуропроводность грунта.

Температуропроводность песка, используемого в качестве насыпного грунта, меняется в довольно узких пределах – от $0,7 \cdot 10^{-6}$ до $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Характерный размер L для системы есть расстояние от нижней кромки пеноплекса до труб ($L = 1,25$ м). В данном случае время τ_0 равно

$$\tau_0 = \frac{1,25^2}{10^{-6} \cdot 24 \cdot 3600} = 20 \text{ сут} \quad (19)$$

(что значительно меньше продолжительности зимнего сезона).

Таким образом, если бы температура атмосферы и скорость ветра оставались неизменными, то к концу сезона в грунте наблюдалось бы стационарное поле температур, вычисляемое с помощью математического аппарата. Поскольку в действительности температура атмосферы и скорость ветра изменяются, необходимо брать осредненные величины по некоторому периоду времени, пред-

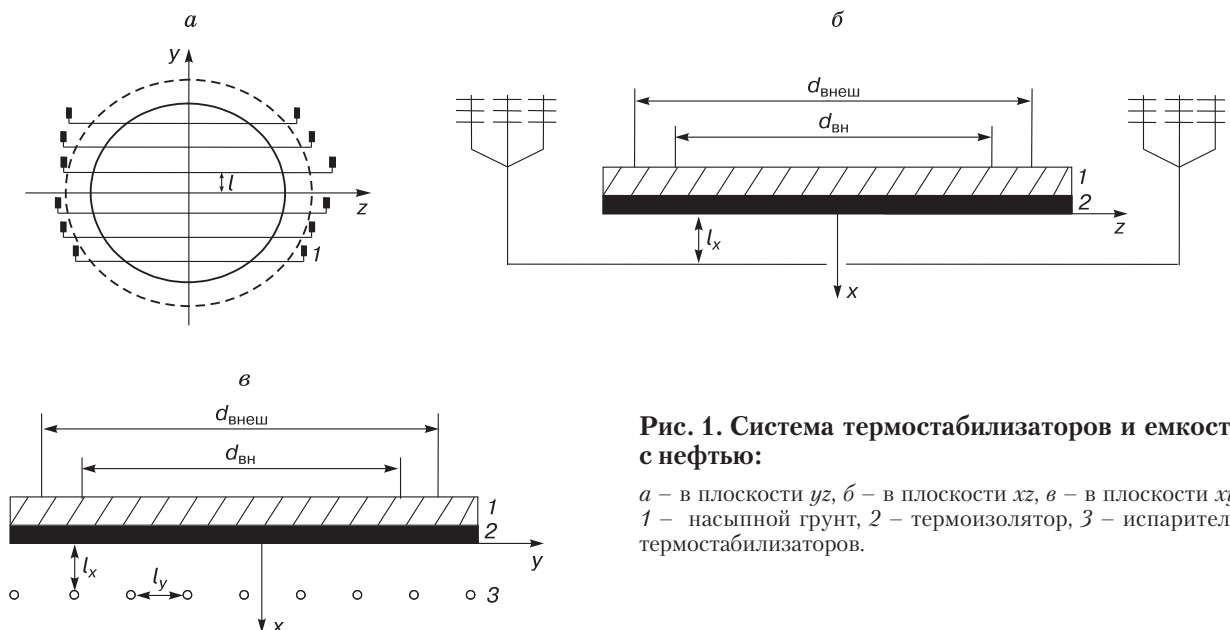


Рис. 1. Система термостабилизаторов и емкость с нефтью:

a – в плоскости yz , b – в плоскости xz , $в$ – в плоскости xy ; 1 – насыпной грунт, 2 – термоизолятор, 3 – испарители термостабилизаторов.

шествующему моменту, в который вычислялось температурное поле. Для этого использованы следующие выражения:

$$w_a(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=i-n+1}^i w_a(k); \quad (20)$$

$$v(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=i-n+1}^i v(k), \quad (21)$$

где $w_a(i)$ – температура атмосферы в i -й день; $v(i)$ – скорость ветра в i -й день; $w_\infty = -0,5^\circ\text{C}$.

На рис. 2 представлено сравнение теоретических кривых температур с данными измерений на середину мая 2008 г. в термометрическом поперечнике и центральной вертикальной скважине. Тер-

мометрический поперечник (ТМП) есть горизонтальная скважина, параллельная днищу емкости с нефтью, перпендикулярная к трубам охлаждающей системы и проходящая через центр емкости. Он расположен на глубине 70 см от нижней кромки изолятора и содержит термометрические датчики, которые находятся на расстоянии 3 м друг от друга по всей длине ТМП. Центральная вертикальная скважина есть скважина, перпендикулярная днищу емкости и совпадающая с ее осью симметрии, а также содержащая термометрические датчики, расположенные по всей ее длине.

Как видно на рис. 2, теоретические и экспериментальные значения температуры наиболее близки при $n = 70$ сут, что значительно больше, чем τ_0 ,

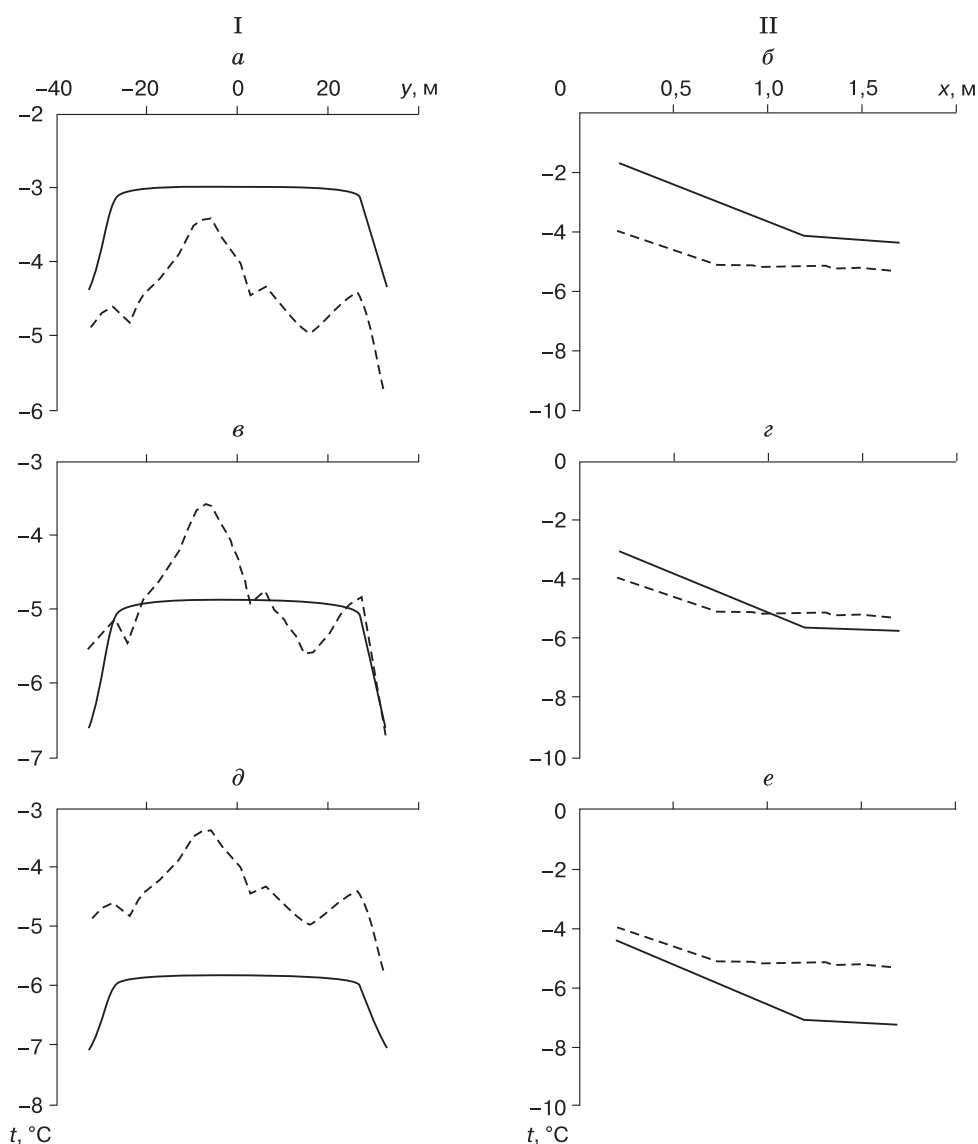


Рис. 2. Сравнение теоретических (сплошные линии) и экспериментальных (штриховые) кривых в термометрическом поперечнике (I) и в центральной вертикальной скважине (II):

$a, б - n = 50$ сут; $в, г - n = 70$ сут; $д, е - n = 80$ сут; y – координата термодатчика в термометрическом поперечнике относительно его центра; x – координата термодатчика в вертикальной скважине относительно нижней кромки пеноплекса.

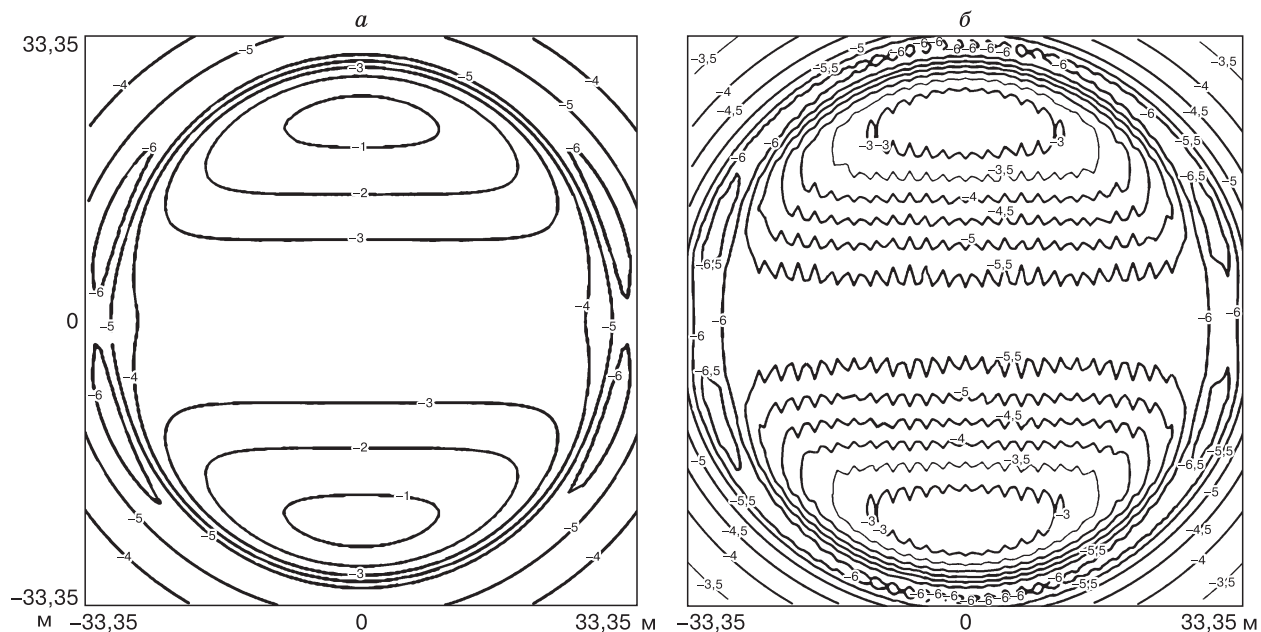


Рис. 3. Поле температур на глубине 50 см (а) и 1,2 м (б) от нижней кромки пеноплекса под емкостью на Варандейском терминале в середине мая 2008 г.

следовательно, стационарный метод может быть использован для расчета температурных полей. Принимая $n = 70$ сут, рассчитаем систему охлаждения емкости с нефтью на Варандейском месторождении. Используя созданную авторами компьютерную программу “Permafrost”, в основу которой заложен приведенный выше математический аппарат, получаем температурные поля, представленные на рис. 3. В случаях, когда в качестве насыпного грунта используется песок или когда летом осуществляется дополнительная заморозка с помощью холодильных машин, можно пренебречь перераспределением влаги и, следовательно, изменением теплофизических характеристик грунта, вызванным чередованием процессов оттаивания и промерзания грунта [Kolunin, 2005; Kolunin, Kolunin, 2006]. В большинстве реальных случаев насыщенным грунтом является песок с малой долей глинистой фракции, поэтому перераспределением влаги можно пренебречь.

Литература

- Андреев М.А., Миронов И.А., Терентьев А.В. Устройство оснований и фундаментов нефтяных резервуаров в сложных условиях Заполярья // Пром. и гражд. стр-во, 2006, № 9, с. 35–36.
- Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Расчет температурных полей в системе емкость с нефтью – сезонное охлаждающее устройство. М., 2009. Деп. в ВИНТИ 30.12.2009, № 840-B2009.
- 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 // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, 2008, с. 34–39.
- Kolunin V.S. Heat and mass transfer in porous media with ice inclusions near the freezing-point // Intern. J. Heat Mass Transfer, 2005, vol. 48, No. 6, p. 1175–1185.
- Kolunin V.S., Kolunin A.V. Heat and mass transfer in saturated porous media with ice inclusions // Intern. J. Heat Mass Transfer, 2006, vol. 49, No. 6, p. 2514–2522.

Поступила в редакцию
31 марта 2010 г.