

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 624.139

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(66-72)

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО СЕЗОННО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
НА ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТА

П.П. Пермяков^{1,2}, С.П. Варламов², М.Н. Железняк²

¹Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН,
677891, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия; permyakov2005@mail.ru

²Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; fe@mpi.ysn.ru

Предложена модель численного расчета тепловлажностного режима грунта вокруг одиночного термосифона. Проведено сравнение замеров температурного поля с результатами численного расчета. Установлена сезонная динамика тепловлажностного режима грунта вокруг сезонно охлаждающего устройства.

Модель тепловлажностного режима, основания сооружений, термосифон, прогноз

INFLUENCE OF VERTICAL SEASONAL COOLING DEVICE
ON SOIL HEAT AND MOISTURE TRANSFER

P.P. Permyakov^{1,2}, S.P. Varlamov², M.N. Zhelezniak²

¹Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS,
1, Oktyabrskaya str., Yakutsk, 677891, Russia; permyakov2005@mail.ru

²Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; fe@mpi.ysn.ru

A model is suggested for numerical simulation of soil heat and moisture transfer around a single seasonal cooling device (a thermosyphon). The results of calculations are compared with temperature measurements. The seasonal dynamic pattern of heat and moisture regime around a thermosyphon is presented.

Model of heat and moisture transfer, foundations of structures, thermosyphon, prediction

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата, наблюдающееся на планете в последнее тридцатилетие, создает ряд проблем при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений в районах развития многолетней мерзлоты. В ряде регионов под влиянием деградации мерзлоты отмечаются деформации и разрушения фундаментов, неравномерное пучение и просадка сооружений. В связи с этим возрастает роль инженерных разработок, направленных на сохранение устойчивости инженерных сооружений, в том числе широко применяемых в мировой практике сезонно охлаждающих установок (СОУ) [Долгих и др., 2011б; Вельчев и др., 2013; Chen et al., 2000], которые аккумулируют холод и способствуют изменению тепловлажностного режима грунта. Данная работа посвящена численному моделированию тепловлажностного режима грунта вокруг СОУ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Тепловлажностный режим грунта вокруг СОУ (рис. 1) описывается следующей системой дифференциальных уравнений в цилиндрической системе координат [Пермяков, Аммосов, 2003; Долгих и др., 2011а; Аникин и др., 2013]:

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - c_B V_r \frac{\partial T}{\partial r} - c_B V_z \frac{\partial T}{\partial z} + L \frac{\partial W_{\text{л}}}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_B}{\partial \tau} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v k_{\Phi} \frac{\partial H}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\Phi} \frac{\partial H}{\partial z} \right) - \frac{\partial \theta_{\text{л}}}{\partial \tau}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial W_B}{\partial \tau} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v k \frac{\partial W_B}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial W_B}{\partial z} \right) - \frac{\partial W_{\text{л}}}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$(r, z) \in \Omega, \quad \tau > 0, \quad \Omega = [0, R] \times [0, H_1].$$

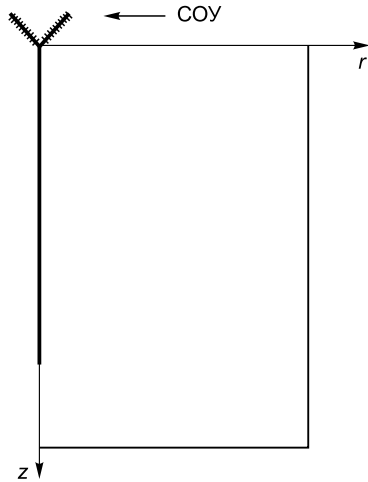


Рис. 1. Область моделирования с сезонно охлаждающим устройством.

В связи с тем что система уравнений содержит три неизвестных параметра, для ее решения используем дополнительно функцию количества незамерзшей воды:

$$W_B = W_{HB}(T, W). \quad (4)$$

На стенках испарителя задается граничное условие теплообмена в зимнее время и его отсутствия летом:

$$r\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} r\alpha_{эф}(T_{н} - T)T_c < 0, \\ 0, & T_c \geq 0, \end{cases} \quad \text{при } r = r_0,$$

где T – температура, К; c, c_B – объемная теплоемкость грунта и воды, Дж/(м³·К); τ – время, с; ρ – объемная плотность скелета, кг/м³; $W = W_{л} + W_B$ – весовая суммарная влажность грунта ($W_{л}$ – за счет льда, W_B – за счет незамерзшей воды); λ – теплопроводность грунта, Вт/(м·К); r, z – пространственные координаты (r – радиус от оси СОУ; z – ось ординат, м); L – объемная теплота фазового перехода, Дж/м³; $V = (V_r, V_z)$ – скорость фильтрации, м/с; k – коэффициент диффузии, м²/с; H – напор, Па; $H = P - z\rho_B g$; P – всасывающее давление, Па; ρ_B – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $k_{ф}$ – коэффициент фильтрации, м/с; $\theta = \theta_{л} + \theta_B$ – суммарная объемная влажность грунта за счет включений льда $\theta_{л}$ и воды θ_B ; $\alpha_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопередачи к наружной поверхности испарителя, Вт/(м²·К); $v = 0, 1$ ($v = 0$ – декартова и $v = 1$ – цилиндрическая системы координат); R, H_1 – ширина и глубина рассматриваемой области Ω , м; $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – производная по нормали n ; $T_{н}, T_c$ – температура испарителя и внешней среды (воздуха), К.

Уравнение (1) описывает процесс промерзания–протаивания грунта с учетом переноса тепла

влажгой. Перемещение воды и льдовыведение учитываются выражениями (2)–(4). Для прогноза влажностного режима можно использовать любое из уравнений (2) и (3), обычно уравнение Ричардса (2) применяется в насыщенных и ненасыщенных грунтах, а уравнение (3) – в ненасыщенных грунтах.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Система уравнений (1)–(3) нелинейная, и численная реализация осуществляется неявной разностной схемой с использованием итераций [Пермяков, Аммосов, 2003]. Система этих уравнений расщепляется на цепочку одномерных нелинейных задач:

$$\left\{ \begin{aligned} c_{эф}^s \frac{\tilde{T}_i^{s+1} - \tilde{T}_i^s}{\tau} &= a(r^v \lambda^s \tilde{T}_r^{s+1})_{\hat{r}} - C_1 \tilde{T}^{s+1} + Li(T^s) W_{\tau}^s, \\ \mu^s \frac{\tilde{P}_i^{s+1} - P_i^s}{\tau} + \frac{\tilde{\theta}_i^s - \theta_i^s}{\tau} &= a(r^v k_{ф}^s \eta^s \tilde{P}_r^{s+1})_{\hat{r}}, \\ \frac{\tilde{W}_i^{s+1} - \tilde{W}_i^s}{\tau} &= a(k^s \eta^s \tilde{W}_r^{s+1})_{\hat{r}}; \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} c_{эф}^s \frac{T_j^{s+1} - \tilde{T}_j^{s+1}}{\tau} &= (\lambda^s T_z^{s+1})_{\hat{z}} - C_2 T^{s+1} + Li(\tilde{T}^{s+1}) \tilde{W}_{\tau}^{s+1}, \\ \mu^s \frac{P_j^{s+1} - \tilde{P}_j^{s+1}}{\tau} + \frac{\tilde{\theta}_j^{s+1} - \theta_j^s}{\tau} &= (k_{ф}^s \eta^s P_z^{s+1})_{\hat{z}} - (k_{ф}^s)_{\hat{z}}, \\ \frac{W_j^{s+1} - \tilde{W}_j^{s+1}}{\tau} &= (k^s \eta^s W_z^{s+1})_{\hat{z}}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где $a = \frac{v+1}{r_{i+1/2}^{v+1} - r_{i-1/2}^{v+1}}$, $\eta = 1 - i(T)$, $i(T) = W_{л}/W$,

$$c_{эф} = c + L \frac{\partial W_{HB}(T, W)}{\partial T},$$

$$C_1 \tilde{T}^{s+1} = c_B (V_{v, i+1/2}^- \tilde{T}_r^{s+1} + V_{v, i-1/2}^+ \tilde{T}_r^{s+1}),$$

$$C_2 T^{s+1} = c_B (V_{z, j+1/2}^- T_z^{s+1} + V_{z, j-1/2}^+ T_z^{s+1}),$$

$$\begin{aligned} & (\lambda^s T_z^{s+1})_{\hat{z}} = \\ & = \frac{2}{h_j + h_{j+1}} \left(\lambda_{j+1/2}^s \frac{T_{j+1}^{s+1} - T_j^{s+1}}{h_j^+} - \lambda_{j-1/2}^s \frac{T_j^{s+1} - T_{j-1}^{s+1}}{h_j^-} \right), \end{aligned}$$

h_{j+1}, h_j – пространственные шаги разностной сетки; T_j, P_j, W_j, θ_j – сеточные функции температуры, давления, весовой и объемной влажности; $\mu^s = \partial \theta_B^s / \partial P$ – функция зависимости объемной влажности от капиллярного давления; η, i – безразмерные коэффициенты (соответственно доли воды и льда, которые вычисляются из выражения $W = W_{л} + W_B$, где $i = W_{л}/W$, $\eta = 1 - i$); индекс s – номер итерации.

Значения параметров граничного условия на поверхности грунта

| Параметр | Месяц | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| Температура воздуха T_c , К | 231.5 | 238.4 | 251.1 | 265.4 | 278.1 | 287.3 | 290.8 | 287.1 | 278.7 | 265.0 | 245.9 | 234.7 |
| Эффективный коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К) | 0.65 | 0.56 | 0.56 | 0.80 | 13.6 | 20.3 | 20.8 | 19.8 | 13.8 | 3.87 | 1.67 | 0.85 |
| Атмосферные осадки, мм | 5.5 | 4.5 | 3.0 | 5.5 | 9.0 | 16.5 | 21.5 | 21.0 | 23.0 | 10.0 | 8.0 | 6.0 |
| Количество воды, испарившейся с поверхности, мм | 0.2 | 0.15 | 1.0 | 5.0 | 22.75 | 34.5 | 35.0 | 24.0 | 5.5 | 1.0 | 0.2 | 0.2 |

Исходные данные для вычислительного эксперимента по тепловлагопереносу определены применительно к природно-климатическим условиям г. Якутска. На поверхности области Ω при $z = 0$ задается граничное условие третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_c)$$

для теплопроводности с эффективным коэффициентом теплоотдачи α , которое учитывает растительный слой и толщину снежного покрова. Количество атмосферных осадков и испарившейся воды с поверхности учитывается уравнениями (2), (3). Среднемесячная температура воздуха T_c , эффективный коэффициент теплоотдачи α , количество осадков и испарение представлены в таблице. На боковых и нижней границах области Ω соблюдается условие отсутствия переноса тепла и влаги.

Литология грунта по глубине представлена: 0–0.3 м – почвенно-растительный слой; 0.3–0.6 м – суглинок светло-желтый; 0.6–8.4 м – песок мелкозернистый; ниже 8.4 м – песок мелкозернистый с включением кварцевой гальки. Рас-

считываются неводонасыщенные и незасоленные грунты строительных площадок г. Якутска, суммарная влажность которых распределена неравномерно с учетом годичного водного баланса. Теплофизические и массообменные характеристики заданы по данным теплобалансового стационара Якутск [Павлов, 1979]. Функциональные зависимости предложенных характеристик от температуры, суммарной влажности и льдистости для различных типов грунтов приведены в работе [Пермяков, Аммосов, 2003]. Эффективный коэффициент теплопередачи к наружной поверхности испарителя ($\alpha_{эф} = 2.8$ Вт/(м²·К)) подобран с учетом паспортных данных термосифона и натурального эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Численный эксперимент 1

На рис. 2 представлены кривые изменения температуры грунта на площадке спортивного комплекса “Триумф” г. Якутска, полученные на-

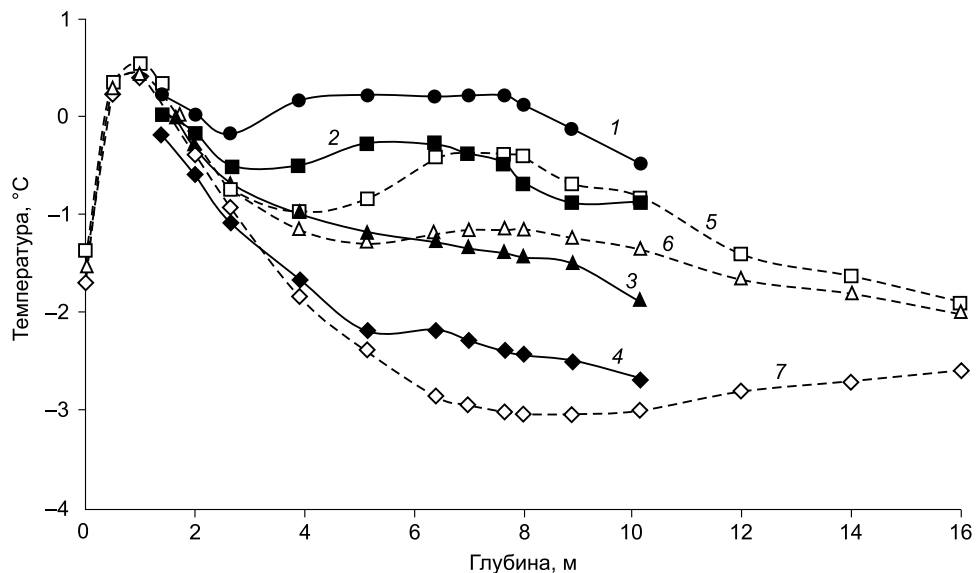


Рис. 2. Сравнение распределения температуры грунтов основания по глубине натуральных замеров с расчетными в спорткомплексе “Триумф”.

Натурные замеры: 1 – 21.10.2010 г. (начальный); 2 – 17.10.2011 г.; 3 – 21.10.2012 г.; 4 – 21.10.2013 г. Численный расчет: 5 – 21.10.2011 г.; 6 – 21.10.2012 г.; 7 – 21.10.2013 г.

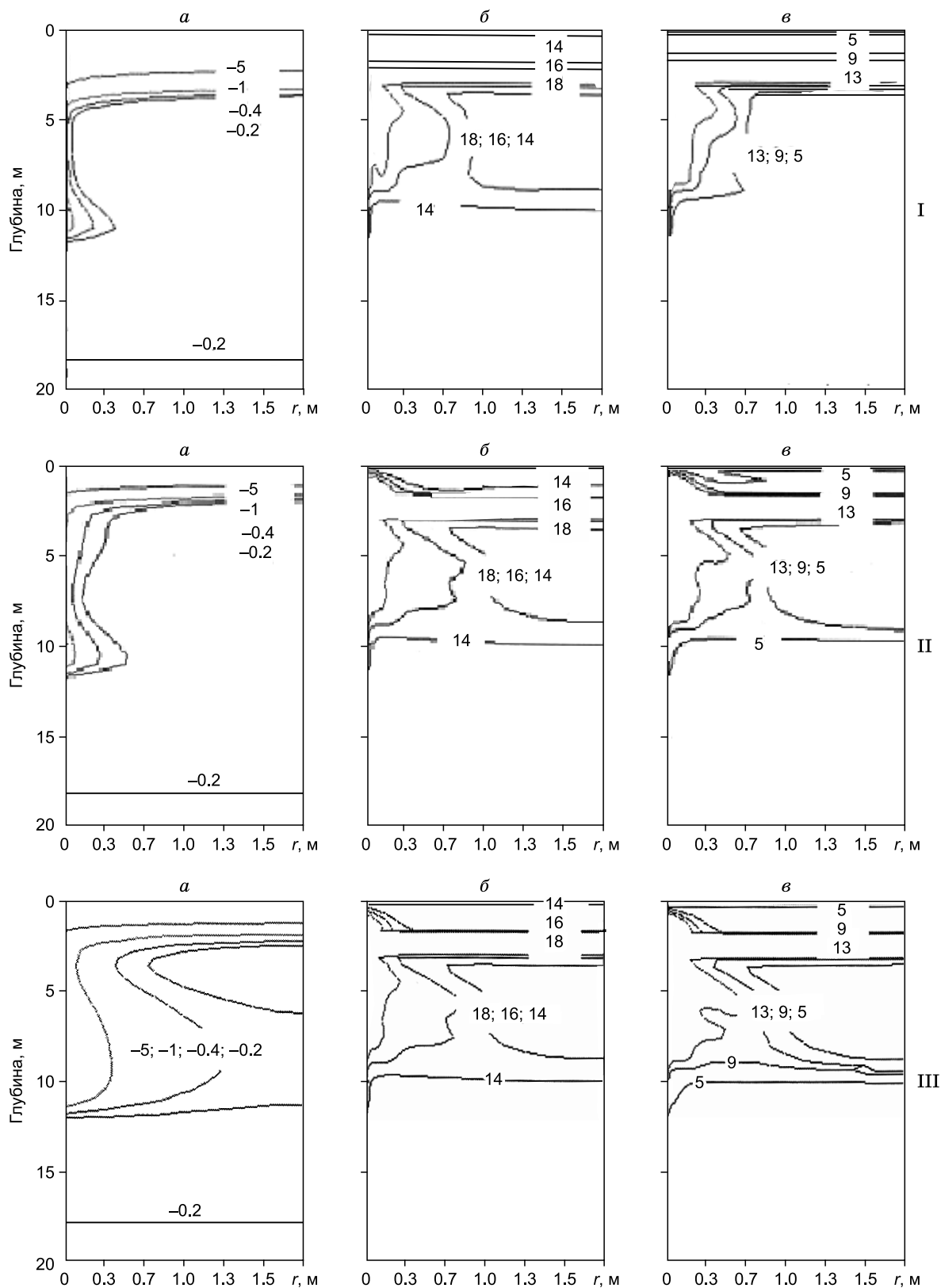
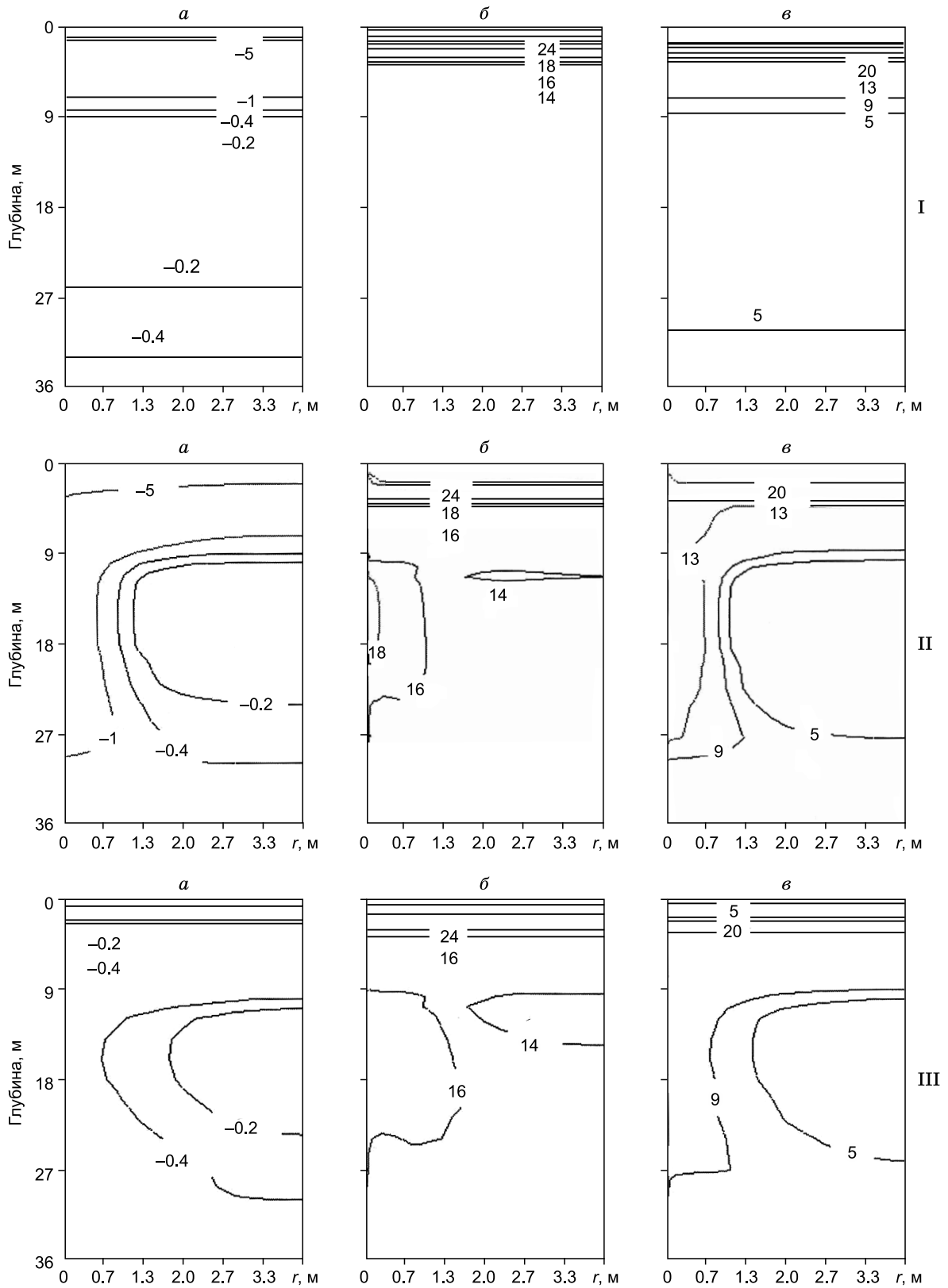


Рис. 3. Распределения температуры, °С (а), суммарной влажности, % (б) и льдистости, % (в) грунтов от оси СО₂:

I – март 2011 г. (первый год); II – март 2012 г. (второй год); III – март 2013 г. (через 3 года).



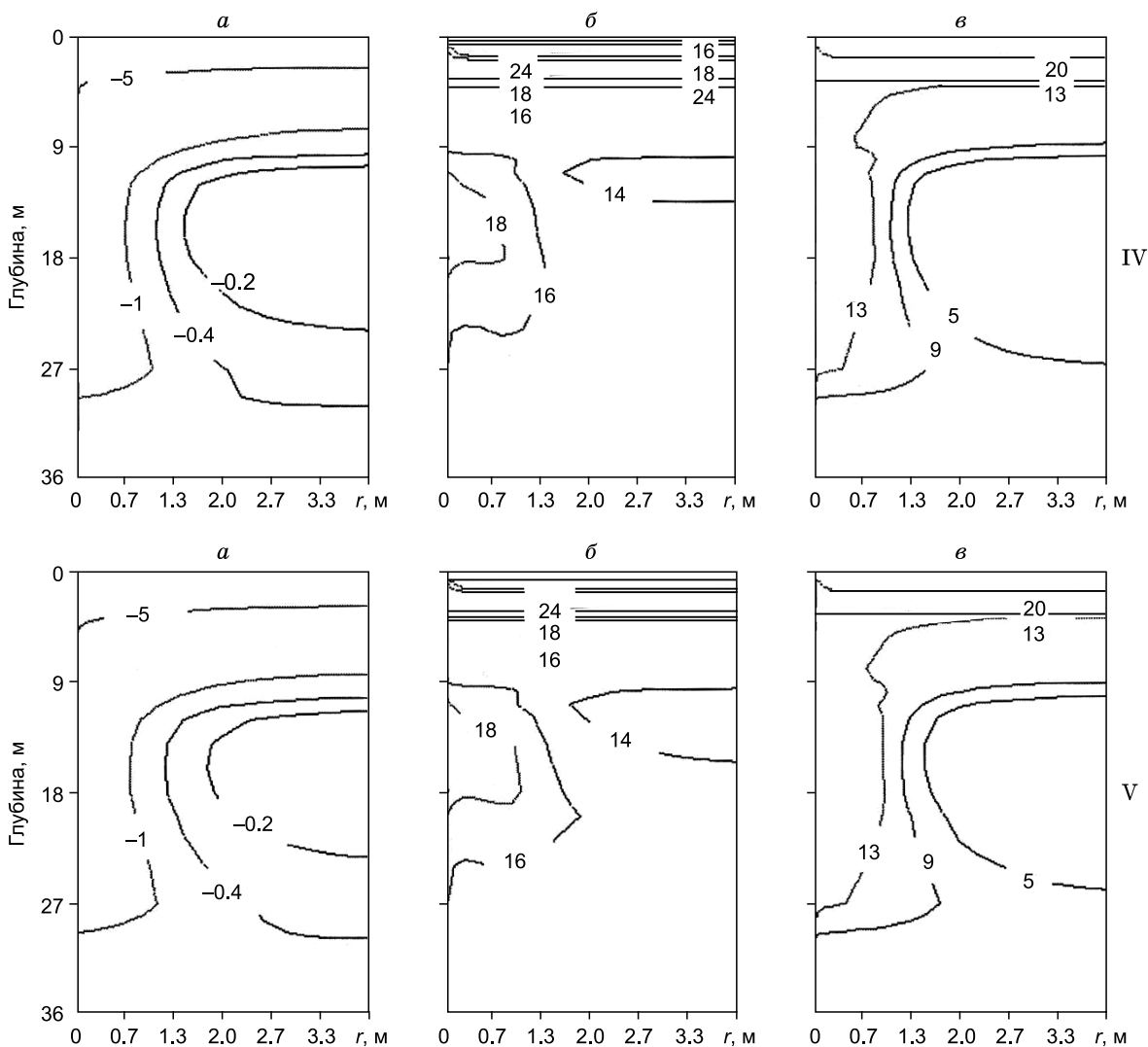


Рис. 4. Начальное распределение температуры, °С (а), суммарной влажности, % (б) и льдистости, % (в) грунтов от оси СОУ:

I – конец октября; II – март (первый год); III – октябрь (первый год); IV – март (через 2 года); V – март (через 3 года).

турными замерах в термосифоне [Bolshev et al., 2014] и предложенным нами численным методом. Термосифон с наружным диаметром 77 мм заполнен хладагентом-22 и имеет глубину 10 м. В октябре 2010 г. (начало эксперимента) на глубине 3.5–8.3 м бурением установлен талый слой. В последующие годы в результате действия сезонно охлаждающего устройства наблюдается понижение температуры грунтов (см. рис. 2). В процессе охлаждения вокруг термосифона формируется льдонасыщенный массив, скорость образования которого зависит от темпа его охлаждения. При функционировании СОУ талый слой промерзает, объем мерзлой зоны увеличивается. Как видно на рис. 2, в части зоны интенсивного охлаждения после летнего растепления вокруг СОУ остается

мерзлый слой, который в дальнейшем способствует понижению температуры грунтов основания до -3°C . Температурные кривые, полученные натурными замерах и численным расчетом, достаточно хорошо согласуются между собой (см. рис. 2).

На рис. 3, I–III представлены кривые распределения температуры, суммарной влажности и льдистости грунтов с глубиной вокруг термосифона в конце марта за три года. В качестве начального распределения температуры взяты натурные замеры по наблюдательной скважине (21.10.2010 г.), а распределение суммарной влажности – по данным инженерно-геологических изысканий. Термосифон работает в зимнее время, как видно из рисунков, с наступлением отрицательной температуры

воздуха. Согласно численным расчетам, с октября до конца марта происходит понижение температуры грунта, которое сопровождается миграцией влаги в зону понижения температуры с образованием ледяного панциря, объем которого с каждым годом постепенно увеличивается.

Численный эксперимент 2

Во втором случае рассматривается формирование тепловлажностного поля до глубины 30 м вокруг СОУ с диаметром $D_0 = 0,04$ м. Такие термосифоны успешно применяются на различных инженерно-технических сооружениях [Долгих и др., 2011а]. Начальное распределение температуры и суммарной влажности грунтов представлено на рис. 4, I. На глубине с 10 по 20 м находится талый слой с суммарной влажностью грунтов 15 %. Распределения температуры, суммарной влажности и льдистости грунта через год (после установки СОУ) в конце апреля представлено на рис. 4, II. В зимнее время вокруг сезонно охлаждающей установки в результате циркуляции хладагента происходит миграция поровой влаги и образуется мерзлый льдонасыщенный слой толщиной 1 м (см. рис. 4, II, в), мощность которого в конце летнего сезона уменьшается (см. рис. 4, III).

С наступлением зимнего времени сезонно охлаждающее устройство начинает понижать температуру прилегающего грунта, наблюдается сегрегационное накопление суммарной влажности вокруг испарителя. Радиус мерзлого слоя вокруг испарителя по сравнению с предыдущими годами постепенно увеличивается. Данный процесс каждый год циклически повторяется, т. е. идет формирование отрицательной температуры и ее понижение, которое сопровождается образованием ледяного панциря, обеспечивающего сохранение многолетней мерзлоты за счет больших расходов тепла на фазовые переходы (см. рис. 4, IV–V).

ВЫВОДЫ

Разработанный алгоритм (5), (6), учитывающий влагоперенос при промерзании грунтов, позволяет выполнить расчеты и моделирование тепловлажностного поля вблизи колонны СОУ.

Результаты численного моделирования подтверждены натурными наблюдениями на спортивном комплексе “Триумф” (Якутск).

Проведенные численные исследования позволили оценить наращивание в процессе эксплуатации СОУ ледяного панциря (льдонасыщенного слоя) за счет миграции влаги вокруг испарителя. Этот процесс необходимо учитывать при теплофизических расчетах и прогнозах формирования теплового режима грунтов. Из проведенных исследований следует, что процессы искусственного замораживания грунтового основания с помощью сезонно охлаждающих устройств обеспечивают устойчивость инженерных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях изменяющегося климата.

Литература

- Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Расчет динамики промерзания грунта под воздействием одиночного термосифона // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 51–55.
- Вельчев С., Окунев С., Рило И. Сохраняя вечное – строим будущее // Нефтегазовая Вертикаль, 2013, № 17, с. 36–39.
- Долгих Г.М., Окунев С.Н., Аникин Г.В. и др. Тепломассоперенос в вертикальных охлаждающих трубах систем ВЕТ при работе на аммиаке // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Междунар. симп. (Мирный, 3–7 сент. 2011 г.). Якутск, ИМЗ СО РАН, 2011а, с. 285–287.
- Долгих Г.М., Окунев С.Н., Захарова В.Н. и др. Прогнозные расчеты мерзлотной противодиффузионной завесы плотины Вилюйской ГЭС-3 с использованием коллекторных систем СОУ // Там же, 2011б, с. 281–283.
- Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов / А.В. Павлов. Новосибирск, Наука, 1979, 286 с.
- Пермяков П.П. Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне / П.П. Пермяков, А.П. Аммосов. Новосибирск, Наука, 2003, 224 с.
- Bolshev K.N., Ivanov V.A., Lebedev M.P. et al. The results of the temperature field monitoring at foundation of “Triumph” stadium in Yakutsk // J. Eng. Heilongjiang Univ., 2014, vol. V, No. 3, p. 266–269.
- Chen R.J., Cheng G.D., Li S.X. Development and prospect of research on application artificial ground freezing // Chinese J. Geotechnical Eng., 2000, vol. 22, p. 40–44.

Поступила в редакцию
20 сентября 2015 г.