КОМПЬЮТЕРНАЯ МАТЕМАТИКА

Математическое моделирование

УДК 519.6:532.546:539.3

В.А. БОГАЕНКО, О.А. МАРЧЕНКО, Т.А. САМОЙЛЕНКО

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ

Рассмотрена задача о притоке воды в котлован и проведен сравнительный анализ результатов численной реализации двух различных математических моделей, описывающих неизотермические процессы неустановившейся напорной фильтрации в деформирующемся грунтовом массиве.

Введение. В работе на примере задачи о притоке воды в котлован представлены сравнительные результаты моделирования нестационарных неизотермических процессов во влагонасыщенных грунтах путем приближенного решения начально-краевых задач для двух квазилинейных параболо-гиперболических систем, проведен анализ расчетов в зависимости от температуры внешней среды, при изменении уровня воды в верхнем водоеме, переменной глубине котлована.

Первая модель представляет собой начально-краевую задачу для системы дифференциальных уравнений, включающей нестационарные уравнения фильтрации, теплопроводности и уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние грунтового массива. Вторая – это начально-краевая задача для системы уравнений динамической консолидации влагонасыщенных грунтов и уравнения теплопереноса.

1. Постановка задачи. Согласно модели I [1] в области $\Omega_{\tilde{T}} = \Omega \times (0, \tilde{T}]$ (рис. 1) рассматривается система дифференциальных уравнений

$$\tilde{\mu}\,\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left(K_\phi(T,\theta)\frac{\partial h}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(K_\phi(T,\theta)\frac{\partial h}{\partial y}\right) = 0,$$

$$c_T\,\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_T\,\frac{\partial T}{\partial x} - c_в v_x T\right) -$$

$$-\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_T\,\frac{\partial T}{\partial y} - c_в v_y T\right) = 0,$$

$$\rho_{гр}\frac{\partial^2 u_{ск}}{\partial t^2}-\mu\Delta u_{ск}-(\lambda+\mu)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u_{ск}}{\partial x}+\frac{\partial v_{ск}}{\partial y}\right)-\frac{\partial P}{\partial x}=0,$$

$$\rho_{гр}\frac{\partial^2 v_{ск}}{\partial t^2}-\mu\Delta v_{ск}-(\lambda+\mu)\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial u_{ск}}{\partial x}+\frac{\partial v_{ск}}{\partial y}\right)-\frac{\partial P}{\partial y}=-\rho_{гр}\,g,\ \ (x,y,t)\in\Omega_{\tilde{T}},\qquad(1)$$

где h – пьезометрический напор; T – температура; $w_{ск}=(u_{ск},v_{ск})^T$ – вектор смещений грунта; $P=\rho_в\,g\,(h-y)$ – гидростатическое давление; $K_ф(T,\theta)$ – коэффициент фильтрации; $\theta=\partial u_{ск}/\partial x+\partial v_{ск}/\partial y$ – объемная деформация; $(v_x,v_y)^T$ – скорость фильтрации; λ, μ – постоянные Ламе; $\tilde{\mu}$ – влагоемкость; c_T, $c_в$ – объемные теплоемкости среды и воды соответственно; λ_T – коэффициент теплопроводности; $\rho_{гр}$, $\rho_в$ – плотности грунта и воды соответственно.

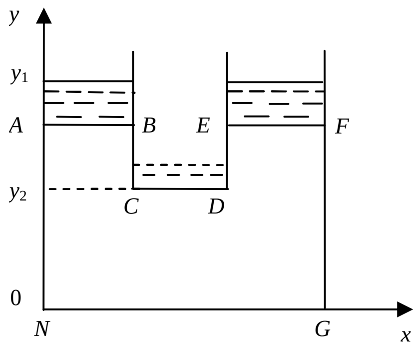


РИС. 1. Расчетная область

Краевые условия:

$$h(x,y,t)=y_1,\ (x,y,t)\in\Gamma^1\times(0,\tilde{T}],\quad h(x,y,t)=y_2+\tilde{h}(t),\ (x,y,t)\in CD\times(0,\tilde{T}],\qquad(2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial n}=0,\ (x,y,t)\in(\Gamma^2\cup GN)\times(0,\tilde{T}],\qquad \frac{\partial T}{\partial n}=0,\ (x,y,t)\in\Gamma^2\times(0,\tilde{T}],\qquad(3)$$

$$T(x,y,t)=T_1,\ (x,y,t)\in(\Gamma^1\cup CD)\times(0,\tilde{T}],\quad T(x,y,t)=T_2,\ (x,y,t)\in GN\times(0,\tilde{T}],\qquad(4)$$

$$u_{ск}=0,\ (x,y,t)\in\Gamma^2\times(0,\tilde{T}],\qquad u_{ск}=v_{ск}=0,\ (x,y,t)\in GN\times(0,\tilde{T}],\qquad(5)$$

$$\tau_s=0,\ (x,y,t)\in(\partial\Omega\setminus GN)\times(0,\tilde{T}],\quad \sigma_n=0,\ \ (x,y,t)\in(\Gamma^1\cup CD)\times(0,\tilde{T}],\qquad(6)$$

где $\Gamma^1=AB\cup EF$, $\Gamma^2=NA\cup BC\cup DE\cup FG$, n – внешняя нормаль к контуру, σ_n, τ_s – нормальная и касательная составляющие вектора напряжений.

Физические параметры следующие: $K_ф(T,\theta)=\bar{K}_ф(T)e^{f(\theta)}$,

$$\bar{K}_ф(T)=\bar{K}_ф(10)(0.7+0.03T),\ \ \bar{K}_ф(10)=\begin{cases}\bar{\bar{K}}_ф,P\ge 0,\\ \bar{\bar{K}}_ф e^{2.48P},P<0,\end{cases}\quad \bar{\bar{K}}_ф=0.3\text{м/сут},$$

$$\tilde{h}(t)=\frac{1}{|CD|}\int\limits_{CD}\int\limits_0^t v_y(x,y,\tau)d\tau d\Gamma,\ \ v_y(x,y,t)=-K_ф(T,\theta)\frac{\partial h}{\partial y},\ \ \rho_{гр}=1.94\text{т/м}^3,$$

$\tilde{\mu}=10^{-3}$, модуль упругости $E=5000\text{т/м}^3$, коэффициент Пуассона $\nu=0.3$.

Начальные условия:

$$h(x,y,0)=H_0(x,y),\quad T(x,y,0)=T_0(x,y),\quad u_{ск}(x,y,0)=U_0(x,y),$$
$$v_{ск}(x,y,0)=V_0(x,y),\quad \frac{\partial u_{ск}}{\partial t}(x,y,0)=\frac{\partial v_{ск}}{\partial t}(x,y,0)=0,\quad (x,y)\in\bar{\Omega}. \tag{7}$$

Дополнительно предполагаем существование условий $\frac{\partial h}{\partial t}(x,y,0)=\tilde{H}_0(x,y)$, $\frac{\partial T}{\partial t}(x,y,0)=\tilde{T}_0(x,y),\ (x,y)\in\bar{\Omega}$. С учетом этого на множестве Z вектор-функций $w(x,y,t)=(h(x,y,t),T(x,y,t),u_{ск}(x,y,t),v_{ск}(x,y,t))^T=$ $=(w_1,w_2,w_3,w_4)^T$, компоненты которых и их производных по времени $\frac{\partial w}{\partial t}(x,y,t),\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,y,t)\quad \forall t\in(0,\tilde{T}]$, а также $\frac{\partial w}{\partial t}(x,y,0)$, $w(x,y,0)$ принадлежат $W_2^1(\Omega)$ и удовлетворяют главным краевым условиям (2), (4), (5), сформулирована обобщенная задача [2]:

$$m(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2},z)+\bar{m}(\frac{\partial w}{\partial t},z)+a(w,z)=(F,z),\quad w\in Z,\ \forall z\in Z_0\quad \forall t\in(0,\tilde{T}], \tag{8}$$

$$(w(\cdot,\cdot,0),z)=(w_0,z),\ \ (\frac{\partial w}{\partial t}(\cdot,\cdot,0),\ z)=(\tilde{w}_0,\ z)\quad \forall z\in Z_0, \tag{9}$$

где

$$m(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2},z)=\rho_{гр}\iint_\Omega\left(\frac{\partial^2 w_3}{\partial t^2}z_3+\frac{\partial^2 w_4}{\partial t^2}z_4\right)d\Omega,$$

$$\bar{m}(\frac{\partial w}{\partial t},\ z)=\iint_\Omega\left(\tilde{\mu}\ \frac{\partial w_1}{\partial t}z_1+c_T\ \frac{\partial w_2}{\partial t}z_2\right)d\Omega\ ,$$

$$a(w,z)=W_1(\ w,\ z)+W_2(w,\ z)+W_3(w,\ z),$$

$$W_1(w,z)=\iint_\Omega\left(K_ф(T,\theta)\left(\frac{\partial w_1}{\partial x}\frac{\partial z_1}{\partial x}+\frac{\partial w_1}{\partial y}\frac{\partial z_1}{\partial y}\right)+\lambda_T\left(\frac{\partial w_2}{\partial x}\frac{\partial z_2}{\partial x}+\frac{\partial w_2}{\partial y}\frac{\partial z_2}{\partial y}\right)\right)d\Omega\ ,$$

$$W_2(w,z)=\iint_\Omega\left((\lambda+2\mu)\left(\frac{\partial w_3}{\partial x}\frac{\partial z_3}{\partial x}+\frac{\partial w_4}{\partial y}\frac{\partial z_4}{\partial y}\right)+\lambda\left(\frac{\partial w_3}{\partial y}\frac{\partial z_4}{\partial x}+\frac{\partial w_4}{\partial x}\frac{\partial z_3}{\partial y}\right)+\right.$$

$$\left.+\mu\left(\frac{\partial w_3}{\partial y}+\frac{\partial w_4}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial z_3}{\partial y}+\frac{\partial z_4}{\partial x}\right)\right)d\Omega\ ,$$

$$W_3(w,z)=\iint_\Omega\left(c_в K_ф(T,\theta)w_2\left(\frac{\partial w_1}{\partial x}\frac{\partial z_2}{\partial x}+\frac{\partial w_1}{\partial y}\frac{\partial z_2}{\partial y}\right)+\rho_в\, g\,(w_1-y)\left(\frac{\partial z_3}{\partial x}+\frac{\partial z_4}{\partial y}\right)\right)d\Omega,$$

$$(F,z)=-\iint_\Omega \rho_{гр}\, g\, z_4\, d\Omega,\;\; w_0=(H_0,T_0,U_0,V_0)^T,\;\; \tilde{w}_0=(\tilde{H}_0,\tilde{T}_0,0,0)^T.$$

Множеству Z_0 принадлежат вектор-функции $z(x,y)=(z_1,z_2,\,z_3,z_4)^T$ с компонентами из $W_2^1(\Omega)$, удовлетворяющими нулевым главным краевым условиям.

Приближенное обобщенное решение задачи (8), (9) $w^N(x,y,t)\in Z^N$ ищется методом конечных элементов на подмножестве $Z^N\subset Z$.

Модель II описывает динамическую консолидацию влагонасыщенных грунтов [1, 3] с учетом конвективного теплопереноса

$$(1-m)\rho_ч\frac{\partial^2 u_{ск}}{\partial t^2}+\frac{\rho_в\, g\, m^2}{\bar{K}_ф(T)}\left(\frac{\partial u_{ск}}{\partial t}-\frac{\partial u_в}{\partial t}\right)-\left(\mu\Delta u_{ск}+(\lambda+\mu)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u_{ск}}{\partial x}+\frac{\partial v_{ск}}{\partial y}\right)\right)-$$
$$-(1-m)\frac{\partial P}{\partial x}=0\,,$$

$$(1-m)\rho_ч\frac{\partial^2 v_{ск}}{\partial t^2}+\frac{\rho_в\, g\, m^2}{\bar{K}_ф(T)}\left(\frac{\partial v_{ск}}{\partial t}-\frac{\partial v_в}{\partial t}\right)-\left(\mu\Delta v_{ск}+(\lambda+\mu)\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial u_{ск}}{\partial x}+\frac{\partial v_{ск}}{\partial y}\right)\right)-$$
$$-(1-m)\frac{\partial P}{\partial y}=-(1-m)\rho_ч\, g,$$

$$m\rho_в\frac{\partial^2 u_в}{\partial t^2}+\frac{\rho_в\, g\, m^2}{\bar{K}_ф(T)}\left(-\frac{\partial u_{ск}}{\partial t}+\frac{\partial u_в}{\partial t}\right)-m\frac{\partial P}{\partial x}=0,$$

$$m\rho_в\frac{\partial^2 v_в}{\partial t^2}+\frac{\rho_в\, g\, m^2}{\bar{K}_ф(T)}\left(-\frac{\partial v_{ск}}{\partial t}+\frac{\partial v_в}{\partial t}\right)-m\frac{\partial P}{\partial y}=-m\rho_в g\,,$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}-\frac{M^в}{m}\left((1-m)\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial u_{ск}}{\partial x}+\frac{\partial v_{ск}}{\partial y}\right)+m\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial u_в}{\partial x}+\frac{\partial v_в}{\partial y}\right)\right)=0,$$

$$c_T\frac{\partial T}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_T\frac{\partial T}{\partial x}-c_в\frac{\partial u_в}{\partial t}T\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_T\frac{\partial T}{\partial y}-c_в\frac{\partial v_в}{\partial t}T\right)=0,\;\;(x,y,t)\in\Omega_{\tilde{T}},\quad (10)$$

где $w_в=(u_в,v_в)^T$ – вектор смещений жидкости; $\bar{K}_ф(T)$ – коэффициент фильтрации, описанный в предыдущей модели; $\rho_ч$ – плотность минеральных частиц; m – пористость ($\rho_{гр}=\rho_ч(1-m)+\rho_в m$); $m=0.39$; $M^в$ – модуль упругости жидкости; $\rho_ч=2.54т/м^3$; $M^в=203\cdot10^3 тс/м^2$.

Краевые условия имеют вид:

$$u_{ск}=0,\ u_в=0,\ \tau_{xy}=0,\ \frac{\partial T}{\partial n}=0,\ (x,y,t)\in\Gamma^2\times(0,\tilde{T}],$$

$$u_{ск}=v_{ск}=0,\ v_в=0,\ T(x,y,t)=T_2,\ (x,y,t)\in GN\times(0,\tilde{T}],$$

$$\sigma_n=0,\ \tau_s=0,\ T(x,y,t)=T_1,\ \ (x,y,t)\in(\Gamma^1\cup CD)\times(0,\tilde{T}],$$

$$P=-\rho_в\ g\ y_1,\ (x,y,t)\in\Gamma^1\times(0,\tilde{T}],\quad P=-\rho_в\ g\ w_{отн,n},\ (x,y,t)\in CD\times(0,\tilde{T}],\quad (11)$$

где $w_{отн,n}$ – нормальная составляющая вектора относительного смещения воды $w_{отн}=w_в-w_{ск}$.

Начальные условия:

$$u_{ск}(x,y,0)=u_в(x,y,0)=U_0(x,y),\ v_{ск}(x,y,0)=v_в(x,y,0)=V_0(x,y),$$

$$P(x,y,0)=\rho_в g(H_0(x,y)-y)\,,\ T(x,y,0)=T_0(x,y)\,,$$

$$\frac{\partial u_{ск}}{\partial t}(x,y,0)=\frac{\partial v_{ск}}{\partial t}(x,y,0)=\frac{\partial u_в}{\partial t}(x,y,0)=\frac{\partial v_в}{\partial t}(x,y,0)=0,\ (x,y)\in\bar{\Omega}\,.\quad (12)$$

Обобщенным решением начально-краевой задачи (10) – (12), при существовании дополнительного условия $\frac{\partial T}{\partial t}(x,y,0)=\tilde{T}_0(x,y),\quad (x,y)\in\bar{\Omega}$, является вектор-функция $w(x,y,t)=(u_{ск}(x,y,t),v_{ск}(x,y,t),u_в(x,y,t),v_в(x,y,t),T(x,y,t))^T=$ $=(w_1,w_2,w_3,w_4,w_5)^T\in Z,$ удовлетворяющая соотношениям вида (8), (9), где

$$m(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2},\ z)=\iint_\Omega\left(\rho_ч(1-m)\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2}z_1+\frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2}z_2\right)+\rho_в m\left(\frac{\partial^2 w_3}{\partial t^2}z_3+\frac{\partial^2 w_4}{\partial t^2}z_4\right)\right)d\Omega\,,$$

$$\bar{m}(\frac{\partial w}{\partial t},\ z)=\iint_\Omega\left(\frac{\rho_в g m^2}{\bar{K}_ф(T)}\left(\frac{\partial(w_1-w_3)}{\partial t}(z_1-z_3)+\frac{\partial(w_2-w_4)}{\partial t}(z_2-z_4)\right)+c_T\,\frac{\partial w_5}{\partial t}z_5\right)d\Omega,$$

$$a(w,z)=W_1(w,\ z)+W_2(w,\ z)+W_3(w,\ z),$$

$$W_1(w,z)=\iint_\Omega\left((\lambda+2\mu)\left(\frac{\partial w_1}{\partial x}\frac{\partial z_1}{\partial x}+\frac{\partial w_2}{\partial y}\frac{\partial z_2}{\partial y}\right)+\lambda\left(\frac{\partial w_1}{\partial y}\frac{\partial z_2}{\partial x}+\frac{\partial w_2}{\partial x}\frac{\partial z_1}{\partial y}\right)+\right.$$

$$\left.+\mu\left(\frac{\partial w_1}{\partial y}+\frac{\partial w_2}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial z_1}{\partial y}+\frac{\partial z_2}{\partial x}\right)\right)d\Omega,$$

$$W_2(w,z)=\frac{M^в}{m}\iint_\Omega\left((1-m)\left(\frac{\partial w_1}{\partial x}+\frac{\partial w_2}{\partial y}\right)+m\left(\frac{\partial w_3}{\partial x}+\frac{\partial w_4}{\partial y}\right)\right)\left((1-m)\left(\frac{\partial z_1}{\partial x}+\frac{\partial z_2}{\partial y}\right)+\right.$$

$$\left.+m\left(\frac{\partial z_3}{\partial x}+\frac{\partial z_4}{\partial y}\right)\right)d\Omega,$$

$$W_3(w,z)=\iint\limits_{\Omega}\left(\lambda_T\left(\frac{\partial w_5}{\partial x}\frac{\partial z_5}{\partial x}+\frac{\partial w_5}{\partial y}\frac{\partial z_5}{\partial y}\right)-c_в\frac{\partial w_3}{\partial t}w_5\frac{\partial z_5}{\partial x}-c_в\frac{\partial w_4}{\partial t}w_5\frac{\partial z_5}{\partial y}\right)d\Omega+$$

$$+\int\limits_{CD}\rho_в g(w_4-w_2)((1-m)z_2+mz_4)d\Gamma\,,$$

$$(F,z)=\iint\limits_{\Omega}\left(-(1-m)\rho_ч gz_2-m\rho_в gz_4+\left(\frac{M^в}{m}\left(\frac{\partial U_0}{\partial x}+\frac{\partial V_0}{\partial y}\right)-\rho_в g(H_0-y)\right)\times\right.$$

$$\left.\times\left((1-m)\left(\frac{\partial z_1}{\partial x}+\frac{\partial z_2}{\partial y}\right)+m\left(\frac{\partial z_3}{\partial x}+\frac{\partial z_4}{\partial y}\right)\right)\right)d\Omega-\int\limits_{\Gamma^1}\rho_в gy_1((1-m)z_2+mz_4)d\Gamma,$$

$$w_0=(U_0,V_0,U_0,V_0,T_0)^T\,,\ \tilde{w}_0=(0,0,0,0,\tilde{T}_0)^T\,,$$

Z – множество вектор-функций, удовлетворяющих главным краевым условиям, и компоненты которых, а также их некоторые частные производные по времени принадлежат $W_2^1(\Omega), \forall t\in(0,\tilde{T}]$. Множеству Z_0 принадлежат вектор-функции $z(x,y)=(z_1(x,y), z_2(x,y), z_3(x,y), z_4(x,y), z_5(x,y))^T$, компоненты которых $z_i\in W_2^1(\Omega),\ \ i=\overline{1,5}$, и удовлетворяют однородным главным краевым условиям.

Для получения приближенного дискретного по времени решения задачи $\{W^j(x,y)\}_{j=0}^{J}\subset Z_t^N$ для обеих моделей используется схема Кранка – Николсона [2, 3]. Значения начальных условий $H_0(x,y)$, $T_0(x,y)$, $U_0(x,y)$, $V_0(x,y)$ в узловых точках берутся из решения соответствующей модели I стационарной задачи, $\tilde{H}_0(x,y)\equiv 0$, $\tilde{T}_0(x,y)\equiv 0$.

2. Анализ результатов расчетов. Ожидаемым для обеих моделей является результат по более быстрому заполнению котлована при более высокой температуре фильтрующейся жидкости. Влияние внешней температуры T_1 на зависимость скорости заполнения котлована от значения напора $y_1=|NA|+H$ (H – толщина поверхностного слоя воды) оказалось несущественным для обеих моделей. На зависимость скорости заполнения котлована от его глубины l влияние температур существенно лишь в случае модели I (рис. 2). Так, для относительной разницы $d\tilde{h}=(\tilde{h}(25)-\tilde{h}(15))/\tilde{h}(15)$ уровней воды в котловане $(\tilde{h}(T_1))(t)$ при $T_1=25^{\circ}C$ и $T_1=15^{\circ}C$ ($T_2=5^{\circ}C$ во всех случаях) получены следующие зависимости на момент $t=400$ час.: при $l=2м$ $d\tilde{h}$ составляет для различных значений H в среднем 0.07, при $l=5м$ – 0.05, при $l=7м$ – 0.03, т. е., зависимость наполняемости котлована от температурного фактора с увеличением глубины котлована уменьшается. Для модели II $d\tilde{h}$ практически не зависит от H и l (при $t=400$ час. составляет в среднем 0.03).

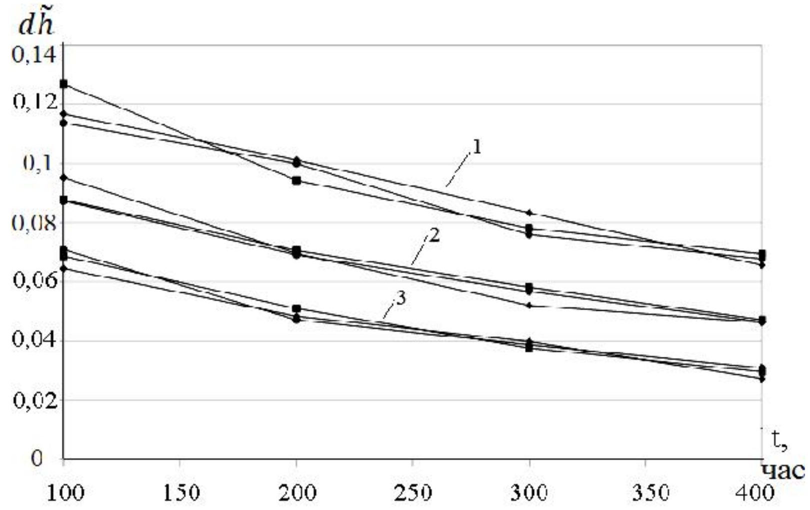
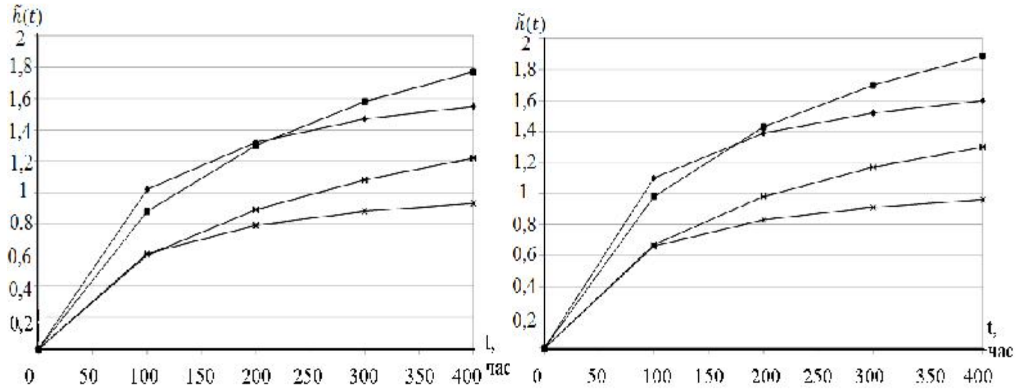


РИС. 2. Относительная разница $d\tilde{h}$ для модели I: линия 1 соответствует $l = 2$м, 2 – $l = 5$м, 3 – $l = 7$м; —◆— соответствует $H = 0.2$м; —■— – $H = 0.6$м; —●— – $H = 1.2$м

На рис. 3, 4 показаны графики изменения по времени $\tilde{h}(T_1)$ для обеих моделей: линии —⧓— соответствуют модели I при $H = 0.2$м, —■— – при $H = 1.2$м; —×— соответствуют модели II при $H = 0.2$м, —◆— – при $H = 1.2$м.

Анализ численных значений вектора смещений грунта $(u_{ск}, v_{ск})^T$ свидетельствует о том, что при решении задачи по модели II при более высокой температуре T_1 и $u_{ск}$, и $v_{ск}$ меньше по абсолютным значениям, чем при более низкой. Так, для $u_{ск}$, полученных при $T_1 = 15^{\circ}C$ и $T_1 = 25^{\circ}C$, относительная разница $du_{ск} = \dfrac{u_{ск}(25) - u_{ск}(15)}{u_{ск}(15)}$ составляет до (– 0.03) при всех H, соответствующая $dv_{ск} = \dfrac{v_{ск}(25) - v_{ск}(15)}{v_{ск}(15)}$ – до (– 0.35) при $H = 0.2$м и до (– 0.38) при $H = 1.2$ м. Уменьшение $u_{ск}$ с увеличением T_1 также характерно и для модели I ($du_{ск}$ составляет (– 0.05) – (– 0.17) при всех H, но при этом происходит увеличение значений $dv_{ск}$ от 0.006 при $H = 0.2$м до 0.025 при $H = 1.2$м).

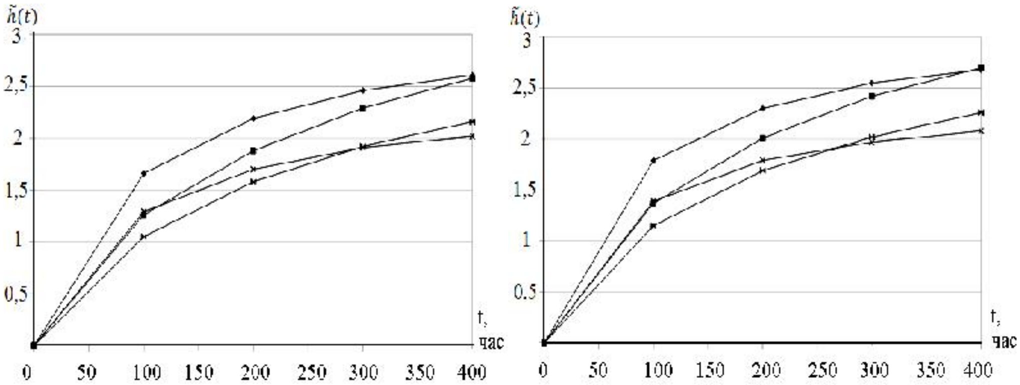
Для всех вариантов расчетов имеет место следующая закономерность: абсолютные значения $u_{ск}$ и $v_{ск}$, полученные по модели I, больше соответствующих значений, рассчитанных по модели II (относительные показатели достигают 60 % для $u_{ск}$ и 40 % – для $v_{ск}$).



$T_1 = 15^{\circ}C$ а

$T_1 = 25^{\circ}C$ б

РИС. 3. Глубина котлована $l = 2$м



$T_1 = 15^{\circ}C$ а

$T_1 = 25^{\circ}C$ б

РИС. 4. Глубина котлована $l = 5$м

Результаты расчетов по модели II вектора смещений воды $w_в$ для периода времени 400 час. при повышении T_1 от $15^{\circ}C$ до $25^{\circ}C$ дают максимальные относительные увеличения абсолютных значений составляющих при наибольшем расчетном уровне воды $H = 1.2м$ и наименьшей расчетной глубине $l = 2м$ ($u_в$ – до 7%, $v_в$ – до 4.7%).

Выводы. В работе проанализированы результаты численного моделирования нестационарных неизотермических процессов во влагонасыщенных грунтах путем приближенного решения начально-краевых задач для двух параболо-гиперболических систем.

В.О. Богаєнко, О.О. Марченко, Т.А. Самойленко

АНАЛІЗ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НЕІЗОТЕРМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
У ҐРУНТОВОМУ МАСИВІ

Розглянуто задачу про притік води до котловану і проведено порівняльний аналіз результатів чисельної реалізації двох різних математичних моделей, що описують неізотермічні процеси неусталеної напірної фільтрації у ґрунтовому масиві за умови його деформації.

V.O. Bohaienko, O.O. Marchenko, T.A. Samoilenko

AN ANALYSIS OF NUMERICAL NON-ISOTHERMAL PROCESSES
IN A SOIL MASSIF MODELING

The problem of water inflow into the pit and comparative analysis of numerical realization of two different mathematical models describing non-isothermal processes of unsteady pressure filtration in the soil massif subject to deformation are considered.

1. *Богаенко В.А., Марченко О.А., Самойленко Т.А.* Анализ численного моделирования динамики грунтового массива при наличии неустановившейся напорной фильтрации. *УСиМ*. 2014. № 4. С. 34 – 41.
2. *Марченко О.А., Самойленко Т.А.* Исследование приближенного решения квазилинейной параболо-гиперболической задачи. *Кибернетика и системный анализ*. 2012. № 5. С. 142 – 154.
3. *Скопецкий В.В., Марченко О.А., Самойленко Т.А.* Построение дискретного приближенного решения нелинейной системы динамики двухфазных грунтовых сред. *Кибернетика и системный анализ*. 2009. № 4. С. 69 – 80.

Получено 22.06.2016

Об авторах:

Богаенко Всеволод Александрович,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,
E-mail: sevab@ukr.net

Марченко Ольга Алексеевна,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,
E-mail: march64@ukr.net

Самойленко Татьяна Анатолиевна,
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины.
E-mail: tkucheruk@rambler.ru