

ности торфа, которая зависит от показателей его качества (зольности и содержания связанной влаги органического вещества), параметров частиц (плотности и крупности) и динамического режима сепарации (скорости потока газа при пневматической сепарации). Критическая влажность элементарного класса крупности высокзольного торфа при пневматической сепарации пропорциональна содержанию связанной влаги, зольности и обратно пропорциональна плотности частицы, кубу ее диаметра и скорости потока газа в шестом степени.

Литература:

1. Зальцман А.М. Пневматическая сепарация торфа. Характер разделения торфяных частиц при пневматической сепарации / А.М. Зальцман // Комплексное использование торфа. – Вып. 2. – АН БССР. – М.: Энергия, 1968. – С. 181-194.
2. Кислов Н.В. Аэродинамика измельченного торфа / Н.В. Кислов; под ред. И.И. Лиштвана. - Минск: Наука и техника, 1987. – 175 с.
3. Яцевич Ф.С. Торф сырье для химической переработки / Ф.С. Яцевич. – Минск: АН БССР, 1981. – 136 с.
4. Верхотуров М.В. Сепарация влажных материалов / М.В. Верхотуров. – Красноярск: Издательство Красноярского университета, 1987. – 136 с.
5. Корінчук Д.М. Розробка композиційного палива на основі торфу і рослинної біомаси для використання в теплоенергетичних установках. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – К.: Інститут технічної теплофізики НАН України. – 2010. – 20 с.
6. Лиштван, И.И. Физика и химия торфа: Учеб. пособие для вузов / И.И. Лиштван, Е.Т. Базин, Н.И. Гамаюнов, А.А.Терентьев. – М.: Недра, 1989.– 304с.

УДК 624.131

## **РАСЧЕТ НДС ОСНОВАНИЙ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ**

**Миронов В.А., Софьин О.Е.**

*Тверской государственный технический университет*

*Напряженно-деформированное состояние грунта описывается модифицированной моделью Кем-клей, объединенной с моделями фильтрационной консолидации и вязкопластичности. Составлены алгоритм и программа метода конечных элементов для расчета процессов вязкопластического деформирования оснований в трехмерной постановке. Выполнено численное моделирование поведения системы «основание-фундамент».*

В настоящее время известны многочисленные примеры эффективного проектирования оснований на основе методов нелинейной механики. Разработок для грунтов, обладающих реологическими свойствами, значительно меньше, что обуславливает актуальность выбранной темы исследования.

Грунт является многокомпонентной средой, состоящий из минеральных частиц (скелета), жидкости и газа, поэтому реологические процессы протекают в нем по-разному в зависимости от степени насыщения пор водой. В неполностью водонасыщенном грунте реологический процесс обусловлен ползучестью скелета и при его описании грунт рассматривается как однокомпонентная среда. В водонасыщенном грунте реологический процесс определяется сжимаемостью и вязким сопротивлением поровой жидкости при отжатии (фильтрационной консолидацией), при этом необходимо учитывать взаимодействие фаз грунта [1].

В предлагаемой работе задачи фильтрационной консолидации и ползучести решаются методом конечных элементов с учетом нелинейного характера деформирования грунта.

Изменение напряженно-деформированного состояния в процессе фильтрационной консолидации определяется на основе совместного решения уравнений равновесия системы элементов и сплошности потоков в ней [2]. Для момента времени  $t_{n+1}$  эти уравнения имеют вид [3, 4]

$$\begin{bmatrix} K & C \\ C^T & -\Delta t K_f - E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta \\ p_{n+1}^w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F + Cp_n^w \\ -Ep_n^w \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

$\Delta \delta$  – приращения перемещений;  $p^w$  – поровое давление;  $\Delta F$  – приращение внешней нагрузки;

$$\left. \begin{aligned} K &= \sum_l \int_V B^T D B dV; \\ C &= \sum_l \int_V B^T m N dV; \\ K_f &= \sum_l \int_V \frac{k_f}{\gamma_w} \left( \frac{\partial N}{\partial x_i} \right)^T \frac{\partial N}{\partial x_i} dV; \\ E &= \sum_l \int_V \frac{n}{K_{wg}} N^T N dV \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

матрица жесткости системы элементов, «стыковочная» матрица между деформационной и фильтрационной задачами, фильтрационная матрица, матрица сжимаемости поровой жидкости, соответственно;  $B$  – матрица, характеризующая геометрическую форму конечного элемента;  $D$  – матрица упругих свойств элемента;  $N$  – функции формы;  $k_f$  – коэффициент фильтрации;  $\gamma_w$  – удельный вес воды;  $n$  – пористость;  $K_{wg}$  – модуль объем-

ной сжимаемости газосодержащей жидкости;  $m = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T$ ;  $V$  – объем элемента;  $l$  – число элементов расчетной области;  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$  – шаг по времени.

Упругопластическое решение строится на основе метода начальных напряжений.

На каждой итерации определяются полные деформации

$$\varepsilon_{n+1} = \varepsilon_n + \Delta\varepsilon. \quad (3)$$

Вычисляются напряжения в предположении упругой работы грунта

$$\sigma_{n+1}^{tr} = D(\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n^p). \quad (4)$$

Далее производится оценка достигнутого уровня напряжений по значению функции нагружения  $f(\sigma_{n+1}^{tr})$ . Если  $f(\sigma_{n+1}^{tr}) \leq 0$ , то

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr}, \quad (5)$$

иначе производится пластическая коррекция.

Скорректированные напряжения  $\sigma_{n+1}$  находятся неявным методом Эйлера путем решения методом Ньютона-Рафсона системы нелинейных уравнений

$$\left[ \begin{array}{cc} D^{-1} + \Delta\lambda \frac{\partial^2 g}{\partial \sigma^2} & \frac{\partial g}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial f^T}{\partial \sigma} & 0 \end{array} \right]_{n+1}^k \left\{ \begin{array}{c} d\sigma \\ d\lambda \end{array} \right\}^k = - \left\{ \begin{array}{c} r_\sigma \\ r \end{array} \right\}_{n+1}^k, \quad (6)$$

где  $g$  – функция пластического потенциала.

Запаздывание вязкопластической деформации во времени учитывается по схеме

$$\sigma_{n+1} = \frac{\sigma_{n+1}^{tr} + \Delta t / \eta \sigma_{n+1}}{1 + \Delta t / \eta}, \quad (7)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости;  $\sigma_{n+1}$  – напряжения, полученные на данном шаге без учета вязкости грунта.

Механическое поведение грунта описывается модифицированной моделью Кем-клей (рис. 1) с функцией нагружения [4]

$$f \equiv g = p - pp_0 + \frac{q^2}{M^2} = 0 \quad (10)$$

где  $q$  и  $p$  – касательная и нормальная компоненты напряжений на октаэдрической площадке;  $p_0$  – давление предварительного уплотнения.

Предельное напряженное состояние грунта определяется уравнением

$$q = Mp, \quad (11)$$

где  $M$  – коэффициент трения.

Функция упрочнения принимается в виде

$$\varepsilon^p = A \ln\left(\frac{p}{p_0}\right), \quad (12)$$

где  $A$  – константа грунта.

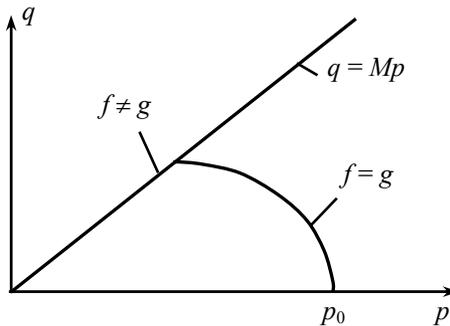


Рис. 1. Модифицированная модель Кем-клей

На основе соотношений теории пластического течения с упрочнением составлены алгоритм и вычислительная программа для ЭВМ для расчета оснований и грунтовых массивов.

В качестве примера рассматривается задача взаимодействия жесткого штампа с грунтовым основанием.

Длина стороны штампа равна 1 м, заглубление подошвы – 0,5 м. Размеры расчетной области составляют  $8 \times 8 \times 4$  м. Вследствие осевой симметрии задачи рассматривается только ее одна четвертая часть, разбитая на 2640 тетраэдров (рис. 2).

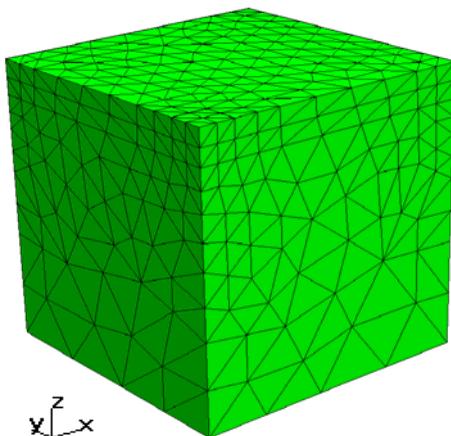


Рис. 2. Расчетная область «штамп-основание»

Грунт основания имеет характеристики: удельный вес  $\gamma = 20,0$  кН/м<sup>3</sup>; модуль деформации  $E = 6,0$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,4$ ; пористость  $n = 0,5$ ; модуль объемной сжимаемости поровой жидкости  $K = 2 \cdot 10^3$  МПа; коэффициент фильтрации  $k_f = 1,0 \cdot 10^{-4}$  м/сут; коэффициент пластической вязкости  $\eta = 0,116$  МПа·сут; коэффициент трения  $M = 0,364$ ; константа  $A = 0,045$ .

На первом шаге численного решения рассчитывалось напряженное состояние от собственного веса грунта, по которому определялся размер начальной поверхности нагружения. Далее осуществлялось нагружение штампа вертикальной нагрузкой ступенями по 0,04 МПа.

Результаты расчета в виде графиков зависимости осадки фундамента  $S$  от нагрузки  $P$  представлены на рис. 3. Кривые 1 и 2 получены, соответственно, для упругого и упругопластического оснований без учета фактора времени. Кривая 3 отвечает нагружению водонасыщенного основания, при котором поровое давление не успевает рассеиваться, кривая 4 – упруговязкопластического основания при выдержке нагрузки на каждой ступени 0,8 сут. В последних двух случаях с увеличением времени нагружения кривые приближаются к упругопластическому решению.

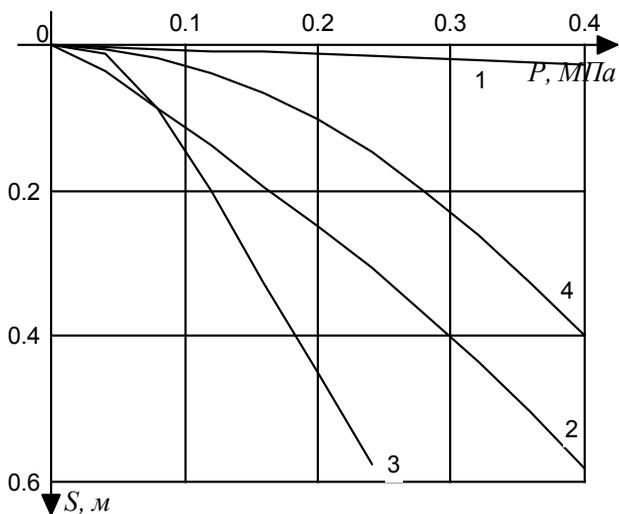


Рис. 3. Зависимость осадки штампа от нагрузки:  
 1 – упругое решение; 2 – упругопластическое решение;  
 3 – упругопластическое решение с учетом фильтрационной консолидации  
 (скорость нагружения 0,05 МПа/сут); 4 – упруговязкопластическое решение

Разработанная программа расчета является универсальной и позволяет решать широкий круг задач механики грунтов.

#### Литература

1. Тер-Мартirosян З.Г. Реологические параметры грунтов и расчеты оснований сооружений. –М.: Стройиздат, 1990. -200 с.
2. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М.: Стройиздат, 1988. -352 с.
3. Миронов В.А., Софьин О.Е. Моделирование процесса упругопластического деформирования водонасыщенного основания при нагружении жестким штампом // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2010. № 1. С. 83-88.
4. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Упруговязкопластическая модель структурно-неустойчивого глинистого грунта // Реконструкция городов и геотехническое строительство. -2005. -№ 9. -С. 221-228.