

Государственное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
Московский государственный строительный университет
Ассоциация московских вузов

Утверждаю
Проректор по УМР и МД

_____ Гагин В.И.
« ____ » _____ 2009 г.

ОТЧЕТ

о выполнении подраздела мероприятий по социальному
обслуживанию населения в части предоставления
образовательных услуг жителям города Москвы

Подраздел №11.5.3.3. «Методы анализа и оценки условий
безопасного применения систем автоматизированного
проектирования зданий и сооружений»
(Научно-информационный материал)

Научный руководитель подраздела	Старший Преподаватель каф. ИПМ МГСУ	(499) 183-59-94		Пеньковой С.Б.
Ответственный исполнитель	М.н.с. НИЦ «Информтехпроект»			Хоркина Ж.Г.
	Должность	Телефон	Подпись Дата	ФИО

Москва, 2009 г.

Под научным руководством и при непосредственном участии старшего преподавателя каф. ИПМ Пенькового С.Б. (отв.исполнитель м.н.с. НИЦ «Информтехпроект» Хоркина Ж.Г.) в рамках подраздела 11.5.3.3. были разработаны, коллегиально рассмотрены и протестированы, а также вручены для практического использования заинтересованным специалистам строительного комплекса Москвы научно-информационные материалы в области методов анализа и оценки условий безопасного применения систем автоматизированного проектирования зданий и сооружений на примере компьютерного проектного моделирования напряженно-деформированного состояния неоднородных оснований с использованием метода конечных элементов, широко применяемого в популярных программных комплексах компьютерного проектирования.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Схемы решения тестовых задач устойчивости систем «объект-основание»	4
2. Постановки задач	7
3. Дискретно-континуальный метод расчета системы «плита – грунтовое основание» с учетом микросейсмических и гравитационных процессов в основании	9
4. Интеграция численных процедур описания моделей грунта в дискретно-континуальный метод.	11
5. Сведения о программной реализации. Примеры расчетов.	14
Рекомендуемая литература	15

СХЕМЫ РЕШЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ «ОБЪЕКТ-ОСНОВАНИЕ».

Настоящий научно-информационный материал подраздела 11.5.3.3 посвящен вопросам расчетного моделирования усталости грунтов оснований зданий и сооружений при квазистатических микроциклических нагрузках в диапазоне частот <0.1 Гц, когда решающую роль в формировании процессов усталости играют процессы ползучести. Наряду с этим в данном диапазоне частот остается корректным применение статической теории упругости. Авторами излагается дискретно-континуальный метод расчета системы «плита – грунтовое основание» с учетом микросейсмических и гравитационных процессов в основании. Метод является дискретно-континуальным в том смысле, что получаемое решение сохраняет континуальный характер по временной переменной, тогда как по пространственным переменным производится аппроксимация с привлечением техники метода конечных элементов (МКЭ). Предложенное сочетание численных и аналитических подходов имеет целый ряд преимуществ. Так, помимо выигрыша в точности, само по себе отсутствие необходимости в выполнении дискретизации по времени является очень важным и значимым фактором, существенным образом сокращающим объемы вычислений. Более того, вследствие специфики исходных данных рассматриваемой задачи (нагрузка включает в себя как быстроосциллирующие, так и слабо меняющиеся, длительные по времени факторы), представляется, что для ее решения непригодны стандартные шаговые по времени процессы. В статье представлены результаты исследований по одному из разделов геоэкологического направления научной деятельности МГСУ, связанному с математическим и полигонным моделированием и натурной верификацией геоэкологической эффективности техногенных вибросейсмических процессов в основаниях строительных объектов. Рассматриваемая далее задача расчета системы «плита – грунтовое

основание» с учетом микросейсмических и гравитационных процессов была инициирована рядом проблем, изучаемых в рамках программы научно-инновационного сотрудничества Министерства образования РФ с Министерством РФ по Атомной энергии (проект №3.01-02 и др. – рук. проф. к.т.н. С.И. Завалишин), совместно с проф. к.т.н. М.С. Хлыстуновым.

2. ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ.

Требовалось провести расчет системы «плита – грунтовое основание» и соответствующей модели. Исследовались расчетные схемы с однородным грунтовым основанием и с неоднородным, многослойным залеганием грунтов (рис. 1). Пусть E_p, ν_p, ρ_p – соответственно модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность материала плиты; E_i, ν_i, ρ_i – тоже для i -го слоя грунта. При статическом расчете учитывались сосредоточенные нагрузки на плиту P и $2P$, распределенная нагрузка q и опционально принимаемые во внимание собственные веса плиты и грунта (для получения первичной информации о системе расчетной моделью являлась двумерная задача теории упругости). Квазистатический расчет системы требовалось провести во временном интервале T (как правило, $T=1-20$ лет, в простейших случаях расчетная модель – линейная теория ползучести), нагрузки в этот период изменяются по закону:

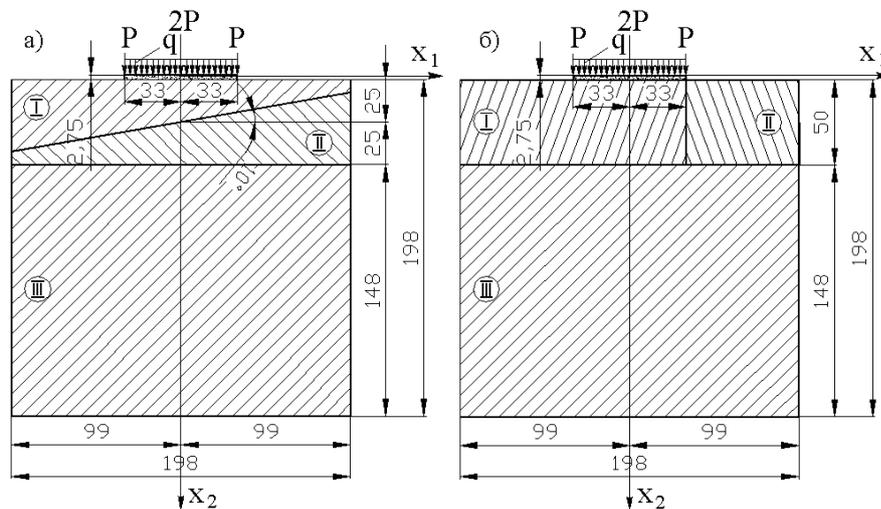


Рис. 1. Примеры расчетных схем: клиновидная (а), складчатая (б) структуры.

$$P(t) = P \cdot K(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

$$\text{где } K(t) = \frac{g + \Delta g^{\text{ms}} + \Delta g^{\text{gr}}}{g}; \quad \Delta g^{\text{ms}} = \Delta g_{\text{max}}^{\text{ms}} \sin \left[\frac{2\pi t}{t_{\text{ms}}} \right]; \quad \Delta g^{\text{gr}} = \Delta g_{\text{max}}^{\text{gr}} \sin \left[\frac{2\pi t}{t_{\text{gr}}} \right]; \quad (2)$$

Δg^{ms} , Δg^{gr} – микросейсмическая и гравитационная составляющие приращения ускорения свободного падения $g = 9.8 \text{ м/сек}^2$; $\Delta g_{\text{max}}^{\text{ms}}$, $\Delta g_{\text{max}}^{\text{gr}}$ –

соответствующие амплитудные значения; t_{ms} , t_{gr} – периоды микросейсмических и гравитационных колебаний (например, по данным НИИ Экспериментальной механики (НИИЭМ) МГСУ $t_{ms} = 0.1$ с, $t_{gr} = 20$ мин).

Пусть ε_{ij} – деформация в направлении оси x_i перпендикулярно оси x_j ; σ_{ij} – напряжение, действующее в направлении x_i перпендикулярно x_j ; $t_{полз}$ – время протекания процесса ползучести до наступления стабилизации.

Напряжения в плите и грунтах основания находятся по формулам:

$$\sigma_{11}(t) = \frac{E_0}{1-\nu^2} \left\{ \varepsilon_{11}(t) + \nu\varepsilon_{22}(t) - \int_0^t [\varepsilon_{11}(\tau) + \nu\varepsilon_{22}(\tau)]K(t-\tau)d\tau \right\}; \quad (3)$$

$$\sigma_{22}(t) = \frac{E_0}{1-\nu^2} \left\{ \varepsilon_{22}(t) + \nu\varepsilon_{11}(t) - \int_0^t [\varepsilon_{22}(\tau) + \nu\varepsilon_{11}(\tau)]K(t-\tau)d\tau \right\}; \quad (4)$$

$$\sigma_{12}(t) = \frac{E_0}{1-\nu^2} \left\{ \varepsilon_{12}(t) - \int_0^t \varepsilon_{12}(\tau)K(t-\tau)d\tau \right\}, \text{ где } K(t-\tau) = \delta \exp[-(\delta + \delta_1)(t-\tau)]; \quad (5)$$

δ, δ_1 – параметры ползучести материала (например, по данным НИИЭМ МГСУ для плиты $\delta = 0.07605$ (1/сут), $\delta_1 = 0.03$ (1/сут); для грунтов – $\delta = 0.001 - 0.02333$ (1/сут); $\delta_1 = 0.1813 - 0.255$ (1/сут)).

Расчетная модель поведения грунта, использованная при моделировании задачи в общей постановке, была предложена проф. д.т.н. З.Г. Тер-Мартirosяном и проф. к.т.н. Л.И. Черкасовой. В работе применялось и несколько упрощенное определяющее соотношение для деформаций грунта:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_0 + \frac{1}{E_0} \Delta \bar{\sigma}_0 + [\bar{\varepsilon}^p(n^*) - \bar{\varepsilon}_0]_+ (1 - \exp(-\beta n)), \text{ где } \bar{\varepsilon}_0 = [\varepsilon_{11}^0 \quad \varepsilon_{22}^0 \quad \varepsilon_{12}^0]^T; \quad (6)$$

$$[\bar{\varepsilon}^p(n^*) - \bar{\varepsilon}_0]_+ = \begin{cases} \bar{\varepsilon}^p(n^*) - \bar{\varepsilon}_0, & \bar{\varepsilon}^p(n^*) - \bar{\varepsilon}_0 < 0 \\ 0, & \bar{\varepsilon}^p(n^*) - \bar{\varepsilon}_0 \geq 0; \end{cases} \quad \bar{\sigma}_0 = [\sigma_{11}^0 \quad \sigma_{22}^0 \quad \sigma_{12}^0]^T. \quad (7)$$

$\bar{\varepsilon}_0$, $\bar{\sigma}_0$ – векторы, содержащие компоненты тензора упругих деформаций и напряжений; E_0 – упругий модуль деформации; $\Delta\bar{\sigma}_0$ – приращение вектора напряжений, учитывающее колебание Δg величины $g = 9.8 \text{ м/сек}^2$,

$$\Delta\bar{\sigma}_0 = k\bar{\sigma}_0 \approx 0.1\bar{\sigma}_0; \quad k = 1 - (g + \Delta g)/g; \quad \beta = 10/n^*; \quad (8)$$

$\bar{\varepsilon}^p(n^*)$ – величина деформации при полной стабилизации (для всех пород покомпонентно принимается равной -0.1); n^* – количество циклов нагружения в момент стабилизации; β – параметр грунта.

Как известно, при циклическом нагружении грунтов оснований сооружений возникают дополнительные осадки и крены фундаментов, которые часто приводят к нарушению нормальных условий эксплуатации сооружений, а иногда и к возникновению аварийных ситуаций. Подобная проблема возникает при эксплуатации тяжелых сооружений типа АЭС, ТЭС, ГЭС при низкочастотных циклических воздействиях на грунты оснований этих сооружений. Источником таких воздействий могут быть гравидинамические процессы в верхних слоях земной коры.

Многофакторный учет рассматриваемых явлений позволяет записать следующее выражение для переменного модуля упругости E :

$$E = E_0 + E_\infty[1 - \exp(-c\sigma_{cp})] + [E_\infty - E(\sigma)][1 - \exp(-kn)], \quad (9)$$

где $E(\sigma) = E_\infty[1 - \exp(-c\sigma_{cp})]$; $c = 10/\sigma_{cp}^{\text{пред}}$; $\sigma_{cp} = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$; (10)

σ_{11} и σ_{22} – нормальные напряжения, действующие вдоль осей x_1, x_2 ; $\sigma_{cp}^{\text{пред}}$ – предельное значение σ_{cp} , при котором изменение модуля упругости стабилизируется; $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}$ – линейные деформации вдоль осей x_1, x_2 и $\varepsilon_{33} = 0$; $\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})$; n^* – предельное значение количества циклов, при котором изменение модуля стабилизируется; $k = 10/n^*$.

В рамках модели опциально полагается, что в грунте не могут возникать растягивающие нормальные напряжения (т.е. $\sigma_{11} \geq 0$; $\sigma_{22} \geq 0$), а на касательные напряжения $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ таких ограничений не налагается.

3. ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СИСТЕМЫ «ПЛИТА – ГРУНТОВОЕ ОСНОВАНИЕ» С УЧЕТОМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСНОВАНИИ.

Разрешающие уравнения задачи относительно перемещений в операторной форме имеют вид:

$$B^*(\theta J)D_0V\bar{u} - B^*(\theta J)RD_0V\bar{u} + C\bar{u} = \bar{F}, \quad (11)$$

где Ω – область, описываемая объектом с границей $\partial\Omega$; $\theta(x)$ – характеристическая функция области; R – интегральный оператор ползучести, определяемый в соответствии с формулами (7)-(9); J – соответствующий якобиан; E, ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала; \bar{u} – вектор перемещений; B – дифференциальная матрица Коши; \bar{F} – вектор внешних нагрузок; D_0 – матрица упругих характеристик для плоской деформации;

$$\bar{u} = [u_1 \quad u_2]^T; \quad \bar{F} = [F_1 \quad F_2]^T; \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} \partial_1 & 0 \\ 0 & \partial_2 \\ \partial_1 & \partial_2 \end{bmatrix}; \quad D_0 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/[2(1-\nu)] \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Нагрузка (6.6) представляется в виде суммы составляющих:

$$\bar{F} = \bar{F}_{stat} + \bar{F}_{harm}, \quad \text{где} \quad \bar{F}_{stat} = [F_{stat,1} \quad F_{stat,2}]^T; \quad \bar{F}_{harm} = [F_{harm,1} \quad F_{harm,2}]^T, \quad (14)$$

\bar{F}_{stat} – постоянная (долговременная); \bar{F}_{harm} – переменная (периодическая).

Разрешающее уравнение при расчете на постоянную нагрузку:

$$B^*(\theta J)D_1V\bar{u} + C\bar{u} = \bar{F}_{const}, \quad \text{где} \quad D_1 = D(1-R); \quad R(x) = \delta(x)/[\delta(x) + \delta_1(x)]; \quad (15)$$

D_1 – модифицированная матрица упругих характеристик; при актуальных $t \gg t_{полз}$ ($t_{полз}$ – время протекания процесса ползучести до стабилизации).

Рассмотрим расчет на переменную нагрузку. Принимая во внимание исходные данные и руководствуясь формулами (1)-(2), можем записать

$$\bar{F}_{harm} = \bar{F}_{ms} + \bar{F}_{gr}, \quad \text{где} \quad F_{ms} = \bar{A}_{ms} \sin(\beta_{ms} t); \quad F_{gr} = \bar{A}_{gr} \sin(\beta_{gr} t), \quad (16)$$

$$\text{где } \bar{A}_{ms} = (\Delta g_{\max}^{ms} / g) \bar{F}; \quad \bar{A}_{gr} = (\Delta g_{\max}^{gr} / g) \bar{F}; \quad \beta_{ms} = 2\pi / t_{ms}; \quad \beta_{gr} = 2\pi / t_{gr}. \quad (17)$$

В этой связи рассматривается случай нагрузки вида $\bar{F}_{\text{harm}} = F \sin(\beta t)$. Имеем:

$$L\bar{u} = \bar{F} \sin(\beta t), \quad \text{где } L = B^*(\theta J)D_0B - B^*(\theta J)RD_0B + C. \quad (18)$$

Пусть $L\bar{v} = \bar{F} \cos(\beta t)$ – вспомогательная задача. Обозначим $\bar{w} = \bar{v} + i\bar{u}$, откуда $L\bar{w} = \bar{F} \exp(i\beta t)$. Решение можно искать в виде $\bar{w} = \bar{w}_0 \exp(i\beta t)$.

После сложения приведенных выше уравнений и преобразований получим:

$$(A + iS)\bar{w} + C\bar{w} = \bar{F}, \quad \text{где } A = B^*(\theta J)(1 - \tilde{\alpha})D_0B; \quad S = B^*(\theta J)\tilde{\beta}D_0B, \quad (19)$$

$$\text{где} \quad \tilde{\alpha} = \alpha / (\alpha^2 + \beta^2); \quad \tilde{\beta} = \beta / (\alpha^2 + \beta^2); \quad \alpha = \delta + \delta_1. \quad (20)$$

Решения задач (19) и (18) соответственно имеют вид:

$$\bar{w} = v_0 \cos(\beta t) + iv_0 \sin(\beta t) + iu_0 \cos(\beta t) - u_0 \sin(\beta t); \quad u = u_0 \cos(\beta t) + v_0 \sin(\beta t). \quad (21)$$

Далее находим деформации и напряжения $\bar{\sigma} = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{12}]^T$:

$$\bar{\sigma} = [\cos(\beta t) - R \cos(\beta t)]\bar{\sigma}_u + [\sin(\beta t) - R \sin(\beta t)]\bar{\sigma}_v; \quad \bar{\sigma}_u = DB\bar{u}_0; \quad \bar{\sigma}_v = DB\bar{v}_0. \quad (22)$$

Исходя из принципа независимости действия сил и в соответствии с методом решения задачи, выполняются три расчета – один на постоянную нагрузку и два на переменные. Полученные результаты суммируются.

4. ИНТЕГРАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ ПРОЦЕДУР ОПИСАНИЯ МОДЕЛЕЙ ГРУНТА В ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНЫЙ МЕТОД.

Рассмотрим вначале интеграцию модели грунта, учитывающей развитие пластических деформаций. Будем полагать, что во всех точках системы реализуется случай

$$\bar{\varepsilon}^p(n^*) - \bar{\varepsilon}_0 < 0. \quad (23)$$

Тогда задача сводится к проблеме минимизации функционала

$$\Phi(\bar{u}) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (\tilde{D}(\bar{\varepsilon} - \tilde{\alpha}\bar{\varepsilon}^p), \bar{\varepsilon}) dx - \int_{\Omega} (\bar{F}, \bar{u}) dx \rightarrow \min \quad (24)$$

или решению системы

$$B^* \tilde{D} B \bar{u} = \bar{F} + B^T \tilde{D} \alpha \bar{\varepsilon}^p, \quad (25)$$

где
$$\tilde{D} = \left[(1 - \alpha) D^{-1} + \frac{0.1}{E_0} I \right]^{-1}; \quad \alpha = 1 - \exp(-\beta n); \quad \tilde{\alpha} = 2\alpha; \quad (26)$$

D – матрица упругих характеристик в случае плоской деформации; I – единичная матрица; \bar{F} – вектор внешних нагрузок.

Если в отдельных областях системы «плита – грунтовое основание» неравенство (23) нарушается, предлагается применять специально разработанный итерационный метод решения задачи.

Первым приближением (итерацией) $\bar{u}^{(0)}$ является решение задачи (24) или иначе системы

$$L_0 \bar{u}^{(0)} = \bar{F}, \quad \text{где} \quad L_0 = B^* \tilde{D} (\bar{\varepsilon} - \alpha \bar{\varepsilon}^p). \quad (27)$$

В дальнейшем основная рекуррентная формула имеет вид:

$$\bar{u}^{(k+1)} = \bar{u}^{(k)} - L_0^{-1} (B^* \bar{\sigma}^{(k)} - \bar{F}), \quad \text{где} \quad \bar{\sigma}^{(k)} = \tilde{D} (\bar{\varepsilon}^{(k)} - \alpha \bar{\varepsilon}^p); \quad \bar{\varepsilon}^{(k)} = B \bar{u}^{(k)}. \quad (28)$$

Записи типа $\bar{u}^{(k)}$, $\bar{\varepsilon}^{(k)}$, $\bar{\sigma}^{(k)}$ обозначают соответственно векторы перемещений, деформаций и напряжений на k -й итерации.

Условие окончания счета (по невязке) принимается в виде

$$\|L_0 \bar{u}^{(k)} - \bar{F}\| < \gamma \|\bar{F}\|, \quad (29)$$

где $\|\cdot\|$ – соответствующая векторная норма; γ – малый множитель, характеризующий точность вычислений, например, $\gamma = 0.1$.

Теперь остановимся на интеграции нелинейной модели грунта с переменным модулем упругости в дискретно-континуальный метод расчета. Рассмотрим алгоритм решения нелинейных задач теории упругости. В его основе лежит вариационная постановка задачи для функционала энергии:

$$\Phi(\bar{u}) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} (\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}) dx - \iint_{\Omega} (\bar{F}, \bar{u}) dx \rightarrow \min, \quad (30)$$

где $\Phi(u)$ – функционал энергии; \bar{u} – вектор-функция перемещений; \bar{F} – вектор-функция правых частей (нагрузка); $\bar{\sigma}$ – вектор-функция напряжений; $\bar{\varepsilon}$ – вектор-функция деформаций; Ω – область определения задачи.

Область Ω разбивается на четырехугольные конечные элементы, двухиндексно нумеруются узлы и элементы сеточной области (рис. 2).

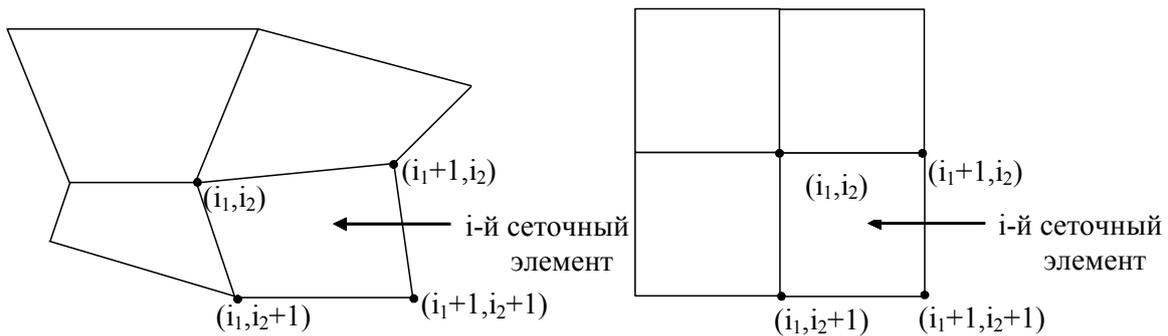


Рис. 2. Дискретизация исходной области.

В соответствии с сеточным разбиением функционал энергии на Ω можно представить в виде суммы функционалов на конечных элементах:

$$\Phi(\bar{u}) = \sum_{i_1} \sum_{i_2} \Phi_{i_1 i_2}(\bar{u}), \quad \text{где} \quad \Phi_{i_1 i_2}(\bar{u}) = \iint_{i\text{-й элемент}} G(\bar{u}, \bar{x}) d\bar{x}. \quad (31)$$

На каждом i -ом элементе восполняем неизвестную вектор функцию \bar{u} и координаты \bar{x} линейно в каждом направлении:

$$u_k(t_1, t_2) = u_k(i) + t_1 \Delta_1 u_k(i) + t_2 \Delta_2 u_k(i) + t_1 t_2 \Delta_{12} u_k(i), \quad k = 1, 2; \quad (32)$$

$$x_k(t_1, t_2) = x_k(i) + t_1 \Delta_1 x_k(i) + t_2 \Delta_2 x_k(i) + t_1 t_2 \Delta_{12} x_k(i), \quad k = 1, 2, \quad (33)$$

где $x(i)$ – координаты i -го узла, $i = (i_1, i_2)$; t_s – локальные координаты: $0 \leq t_s \leq 1$, $s = 1, 2$; $f(i)$ – значение f функции в $x(i)$;

$$\Delta_1 f(\mathbf{i}) = f(i_1 + 1, i_2) - f(\mathbf{i}); \quad \Delta_2 f(\mathbf{i}) = f(i_1, i_2 + 1) - f(\mathbf{i});$$

$$\Delta_{12} f(\mathbf{i}) = f(i_1 + 1, i_2 + 1) - f(i_1 + 1, i_2) - f(i_1, i_2 + 1) + f(\mathbf{i}). \quad (34)$$

Переходим от исходного сеточного разбиения к топологически эквивалентной сетке с элементами в виде единичных квадратов. Восполнение определяет вектор-функцию \bar{u} ее значениями в узлах сетки. Следовательно, решение задачи теории упругости сводится к определению вектора узловых значений $u_k(\mathbf{i})$. Обозначим глобальный вектор узловых значений \bar{U}_{gl} . Для его определения был предложен итерационный процесс:

$$\bar{U}_{gl}^{(k+1)} = \bar{U}_{gl}^{(k)} - A_k^{-1} \bar{F}^{(k)}, \quad k = 0, 1, \dots; \quad \bar{U}_{gl}^0 \equiv 0, \quad (35)$$

где A_k – матрица, коэффициенты которой A_{ij}^k определяются как

$$A_{ij}^k = [\Phi(\bar{U}_{gl}^{(k)} + \alpha_1 \bar{e}_i + \alpha_2 \bar{e}_j) - \Phi(\bar{U}_{gl}^{(k)} + \alpha_1 \bar{e}_i) - \Phi(\bar{U}_{gl}^{(k)} + \alpha_2 \bar{e}_j) + \Phi(\bar{U}_{gl}^{(k)})] / (\alpha_1 \alpha_2); \quad (36)$$

$\bar{F}^{(k)}$ – вектор невязки, элементы которого $F_i^{(k)}$ вычисляются по формуле

$$F_i^{(k)} = \frac{1}{\alpha_1} \left[\Phi(\bar{U}_{gl}^{(k)} + \frac{\alpha_1}{2} \bar{e}_i) - \Phi(\bar{U}_{gl}^{(k)} - \frac{\alpha_1}{2} \bar{e}_i) \right]; \quad (37)$$

\bar{e}_i – единичный вектор: $\bar{e}_i(j) = \delta_{i,j}$; $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера; $\alpha_1 > 0$ и $\alpha_2 > 0$ выбираются в виде доли от величины очередного приближения; i, j – индексы сплошной нумерации; $\bar{U}_{gl}^{(k)}$ – приближение к \bar{U}_{gl} на k -й итерации.

Критерий окончания итерационного процесса (например $\varepsilon_{\max} = 0.1$):

$$\|\bar{F}^{(k)}\| / \|\bar{F}^{(0)}\| < \varepsilon = \varepsilon_{\max}. \quad (38)$$

5. СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ.

Описанный в настоящем НИМ дискретно-континуальный метод расчета системы «плита – грунтовое основание» с учетом микросейсмических и гравитационных процессов в основании реализован в программном комплексе DCMDyn, который по желанию пользователя обеспечивает построение полей изолиний компонент напряжений и перемещений в заданной зоне плиты и грунтового массива, построение эпюр напряжений и перемещений в заданных сечениях грунта и плиты, а также по подошве плиты, построение эпюр поперечных сил и изгибающих моментов, действующих в плите, построение полей изолиний расчетных модулей упругости в заданной области толщи грунтового массива.

Программный комплекс DCMDyn написан на языке FORTRAN стандарта FORTRAN-90/95 с использованием Compaq Visual Fortran 6.6b и Intel Fortran Compiler 7.0, предназначен для работы в операционных системах Microsoft Windows 95/98/NT/2000/ME/XP/2003 Server. В комплексе DCMDyn предусмотрена многоуровневая диагностика ошибок, при их обнаружении выдаются предупреждающие сообщения с указаниями их характера и местонахождения.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Аганов В.П.* Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 248 с.
2. *Александров А.В., Потапов В.Д.* Сопротивление материалов. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 2002. – 400 с.
3. *Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П.* Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 2007. – 560 с.
4. *Александров А.В., Потапов В.Д., Косицын С.Б., Долотказин Д.Б.* Строительная механика. – М.: Высшая школа, 2007. – 511 с.
5. *Андреев В.И.* Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел.–М.: АСВ, 2002.–288 с.
6. *Барбакадзе В.Ш.* Долговечность и надежность конструкций и сооружений. – Бостон, США, Budget Printing Center, 2006. – 608 с.
7. *Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.* Численные методы. – М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2007. – 636 с.
8. *Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А.* Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. – М.: АСВ, 1995. – 572 с.
9. *Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И.* Расчет конструкций на упругом основании. – М., Стройиздат, 1984. – 679 с.
10. *Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В.* Теория упругости и пластичности. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 416 с.
11. *Горшков А.Г., Трошин В.Н., Шалашилин В.И.* Сопротивление материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.
12. *Золотов А.Б.* Постановка и алгоритмы численного решения краевых задач строительной механики методом стандартной области. Дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук: 05.23.17. МГСУ. М.: 1989.

13. *Золотов А.Б., Акимов П.А.* Некоторые аналитико-численные методы решения краевых задач строительной механики: Монография – М.: Издательство АСВ, 2004. – 200 с.
14. *Золотов А.Б., Акимов П.А.* Практические методы расчета строительных конструкций. Численно-аналитические методы: Монография – М.: Издательство АСВ, 2006. – 208 с.
15. *Золотов А.Б., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Мозгалева М.Л.* Математические методы в строительной механике (с основами теории обобщенных функций). – М.: Издательство АСВ, 2008. – 336 с.
16. *Золотов А.Б., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Мозгалева М.Л.* Численные и аналитические методы расчета строительных конструкций. – М.: Издательство АСВ, 2009. – 336 с.
17. *Золотов А.Б., Ларионов А.В., Мозгалева М.Л., Мсхалая Ж.И.* Постановка и аппроксимация краевых задач методом расширенной области. М.: МИСИ, 1992. – 86 с.
18. *Мкртычев О.В.* Сопротивление материалов. – М.: Издательство АСВ, 2005. – 104 с.
19. *Новацкий В.* Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
20. *Перельмутер А.В., Сливкер В.И.* Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. – Киев: Сталь, 2002. – 445 с.
21. *Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
22. *Саргсян А.Е.* Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов. – М.: Высшая школа, 2000. – 288 с.
23. *Саргсян А.Е.* Строительная механика. – М.: Высшая школа, 2004. – 464 с.
24. *Секулович М.* Метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1993. – 664 с.
25. *Сидоров В.Н.* Лекции по сопротивлению материалов и теории упругости. М.: РИЦ Генштаба ВС РФ, 2002. – 352 с.

26. *Сидоров В.Н., Ахметов В.К.* Математическое моделирование в строительстве. – М.: Издательство АСВ, 2007. – 336 с.
27. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.