

DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-4-11-31

Корягина С.А. \*, менеджер по развитию бизнеса,  
Компания OCS, Россия

\*Ответственный автор E-mail: [alexem87@yandex.ru](mailto:alexem87@yandex.ru)

## ИНФОРМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВОМ КАК ОСНОВЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ

**Аннотация:** в статье приведены принципы и алгоритмы метода конечных элементов в решении задач геотехники с учетом сейсмических воздействий для определения напряженно-деформированного состояния сооружений и устойчивости склона, реализованные в программном комплексе Midas GTS NX. GTS NX позволяет выполнять расчеты различных типов геотехнических задач и решать комплексные геотехнические задачи в единой программной среде. GTS NX охватывает весь спектр инженерно-геотехнических проектов, включая расчеты системы "основание-сооружение", глубоких котлованов с различными вариантами крепления, тоннелей сложной формы, расчеты консолидации и фильтрации, а также расчеты на динамические действия и расчеты устойчивости. При этом все типы расчетов в GTS NX возможно выполнять как в 2D, так и в 3D постановке. Автор не претендует на авторство метода конечных элементов, но не может обойтись без наведения основных уравнений, поскольку это влияет на определение границ использования, формулирование алгоритмов построения расчетных схем и на анализ результатов расчета.

**Ключевые слова:** строение, сооружение, деформация материала, обработка данных

### Введение

При проектировании любой конструкции по использованию технологий информационного моделирования инженеру необходимо решать вопросы, связанные с определением количества параметров, их вида и времени использования [2]. Использование большого количества параметров отдельных элементов приводит к увеличению сроков проектирования и объемов машинной памяти для хранения и обработки таких файлов [5]. Но уменьшение объема информации может привести к некачественному выполнению проекта и нивелированию всех преимуществ информационного моделирования [10].

Далее приведена методика определения минимального количества информации относительно элементов конструкции причала типа тонкой стенки [13]. Для построения методики будем использовать общие подходы к определению качества информации при ее компьютерной обработке [4].

Для определения оптимального количества информации (параметров элементов) следует уделить внимание следующим показателям: важность, полнота и адекватность информации [7].

Важность информации (параметра) – обобщенный показатель, характеризующий значимость информации с точки зрения тех задач, для решения которых используется, а с другой – с точки зрения организации обработки (хранения и использования). Другими словами, важность информации будем оценивать по двум группам критериев: по назначению информации и с условиями ее обработки [11]. При этом следует отметить, что параметры связанные с обеспечением надежности сооружений следует относить к чрезвычайно важным и значительной важности для решения задач [9].

Развитие компьютерных технологий привело к всестороннему использованию метода конечных элементов как основного метода определения напряженно-деформированного состояния сооружений [3]. Метод конечных элементов используется в инженерной практике уже более 50 лет, хотя его основы были сформулированы еще в 40-х годах прошлого века [8]. За это время претерпели значительные изменения: методы триангуляции, виды аппроксимирующих функций, методы решения и упрощения систем алгебраических уравнений, вид и состав матрицы жесткости и матрицы масс, модели деформирования материалов конструкций и грунтов оснований и другие параметры [14]. В настоящее время адекватность использования метода конечных элементов определяется достоверностью и точностью моделей нагрузки, моделей работы материалов и грунтов, моделей разрушения [6]. Именно определение деформаций сооружений на различных этапах эксплуатации является важной составляющей обеспечения надежности сооружения и безаварийной эксплуатации, что невозможно без использования соответствующих моделей деформирования почв и современных методов расчета [12]. Современные программные комплексы, используемые для решения задач инженерной геотехники, такие как Plaxis и Midas GTS NX насчитывают более 20 моделей материалов [15]. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Разобраться в тонкостях использования иногда довольно сложно [19].

Вопрос выбора и применения грунтовых моделей, используемых при компьютерном моделировании оснований зданий и сооружений, а также теоретическое обоснование и методики определения их параметров, является достаточно острым [1]. В работе в качестве модели деформирования грунта используется: модель Мора-Кулона (Mohr-кулоновского предоставления сетей); модель грунта, укрепления (Hardening Soil); модель грунта, укрепляющаяся, с учетом малых деформаций Hardening Soil (small strain stiffness) [18]. Отдельные рекомендации по использованию этих моделей и определение соответствующих параметров были разработаны и предложены в работах отечественных и зарубежных ученых И.И. Солодея, А.Ю. Мерного, А.С. Тер-Мартirosяна, Brinkgreve E.D., T. Benz, J. Atkinson и G. Sallfors, R. F. Obrzud. Вышеупомянутые труды вносят значительный вклад в распространение и использование современных грунтовых моделей при компьютерном моделировании сооружений различного назначения [16].

Следует иметь в виду, что, применяя линейно-упругие и идеально пластические модели деформирования грунта в расчетах методом конечных элементов деформации могут быть занижены, что, в дальнейшем, влияет на определение усилий, что рассчитаны для опорных элементов конструкции [20]. Модели, учитывающие изменение жесткости при малых деформациях, концентрируют развитие деформации вокруг ячейки (приложения нагрузки или на контакте с несущими элементами сооружения), аналогично тому, что наблюдается в действительности [17].

### Методы и материалы

Алгоритм определения собственных значений является фундаментальным алгоритмом анализа нормальных колебаний

$$K\phi_i - \lambda_i B\phi_i = 0 \text{ (без добавления)} \quad (1)$$

где  $K$  – матрица жесткости;  $B$  – матрица масс ( $M$ ) при определении нормальных колебаний.

В GTS NX в соответствии с методами определения собственных значений зависит от метода решения системы уравнений. Для мультифронтального метода решения системы уравнений (который является базовым) используется пере дискретизация Lanczos, а для решения плотной матрицы используется алгоритм определения собственных значений или прямой метод решения системы уравнений с использованием плотной матрицы.

Вектор собственных значений, который является результатом решения задачи по определению собственных форм, удовлетворяет уравнению (2)

$$\alpha (K\phi_i - \lambda_i B\phi_i) = K\phi_i - \lambda_i B\phi_i = 0 \quad (2)$$

$$\phi_i = \alpha\phi_i \quad (3)$$

В GTS NX используется процесс нормализации вектора собственных значений

$$\phi_i^T M \phi_i = 1 \quad (4)$$

Алгоритм расчета собственных форм обеспечивает лишь приближенное решение даже при использовании прямого метода решения системы уравнений с плотной матрицей, и его точность не может быть гарантирована. Поэтому для проверки точности вычисленных собственных форм и собственного вектора используются следующие показатели: обобщенная масса и жесткость, потеря ортогональности и размер погрешности.

Обобщенная масса

$$m_i = \phi_i^T B \phi_i \quad (5)$$

Обобщенная жесткость

$$k_i = \phi_i^T K \phi_i \quad (6)$$

Потеря ортогональности

$$\delta_i = \max \left( \frac{\phi_{i-1}^T K \phi_i}{k_i}, \frac{\phi_{i-1}^T B \phi_i}{b_i} \right) \quad (7)$$

Размер погрешности

$$e_i = \frac{K\phi_i - B\phi_i}{K\phi_i} \quad (8)$$

После определения собственных частот, периодов и форм собственных колебаний, приведены выше, эти величины могут быть использованы для вычисления дополнительных параметров, таких как эффективная модальная масса или модальный коэффициент участия.  $i$ -й модальный коэффициент участия выражается величиной

$$\Gamma_{i\alpha} = \frac{1}{m_i} \phi_i^T M T_\alpha \quad (9)$$

где  $m_i$  – обобщенная масса,  $\alpha$  1,2,3,4,5,6 – индекс степени свободы,  $T_\alpha$  – матрица, которая представляет размер инерционной жесткости и определяется для каждого узла

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z-z_0 & y_0-y \\ 0 & 1 & 0 & z_0-z & 0 & x-x_0 \\ 0 & 0 & 1 & y-y_0 & x_0-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \end{Bmatrix}, e_\beta = \delta_{\alpha\beta} \quad (10)$$

где  $x_0, y_0, z_0$  определяют центр вращения, определяются для произвольного узла или для центра масс всей модели.

Модальная масса определяется для каждого направления и может быть без труда вычислена с использованием модального коэффициента участия

$$m_{i\alpha}^{ef} = (\Gamma_{i\alpha})^2 m_i \quad (11)$$

Сумма эффективных масс для всей модели равна массе всей модели за исключением узлов, на которые наложены предельные условия.

### Результаты и обсуждения

Метод суперпозиции форм может быть использован в линейноспектральных расчетах. Метод суперпозиции форм использует собственные формы, полученные в результате расчета собственного вектора (вместо прямого решения линейного уравнения динамического равновесия)

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u(t) = f(t) \quad (12)$$

Перемещение в пространственной системе координат  $u(t)$  могут быть выражены в виде сочетания модальных перемещений  $\xi(t)$  с использованием форм собственных колебаний

$$u(t) = \Phi \xi(t), \Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N] \quad (13)$$

С учетом сказанного уравнение динамического равновесия (12) может быть записано в модальной системе координат следующим образом:

$$[\Phi^T M \Phi] \ddot{\xi}(t) + [\Phi^T C \Phi] \dot{\xi}(t) + [\Phi^T K \Phi] \xi(t) = \Phi^T f(t) \quad (14)$$

В общем случае, при использовании суперпозиции форм, формы высшего порядка исключаются, и используется только часть форм низшего порядка для формирования формы  $\Phi$ , и поэтому уравнение (14) является приближением уравнения (12). Таким образом, если в расчетах по определению действительных физических перемещений учтено недостаточное количество собственных форм, точность результатов таких расчетов может быть существенно снижена.

Уравнение равновесия форм формируется независимо для каждой формы колебаний, когда модальная матрица демпфирования  $\Phi^T C \Phi$  равна нулю

$$m_i \ddot{\xi}_i(t) + k_i \xi_i(t) = p_i \quad (15)$$

где  $m_i$  –  $i$ -я модальная масса,  $k_i$  –  $i$ -я модальная жесткость,  $p_i$  –  $i$ -я модальная нагрузка,  $\xi_i$  – модальное перемещение.

При использовании суперпозиции форм уравнение равновесия может быть сокращено до числа переменных соответствующих числу используемых собственных форм, и расчет может быть выполнен эффективно тогда, когда уравнение равновесия форм полностью разделено по формам.

Если модальная матрица масс приведена к диагональному виду, а из уравнения модальной равновесия (15), которое сокращено с помощью собственной формы, исключены сообщения, она может быть выражена в отдельной форме для каждой моды по типу уравнения (16)

$$m_i \ddot{\xi}_i(t) + b_i \dot{\xi}_i(t) + k_i \xi_i(t) = p_i(t) \quad (16)$$

где  $b$  –  $i$ -то модальное демпфирование.

Или записано в следующем виде

$$\ddot{\xi}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{\xi}_i(t) + \omega_i^2 \xi_i(t) = \frac{1}{m_i} p_i(t) \quad (17)$$

$\zeta_i = \frac{b_i}{(2m_i \omega_i)}$  – коэффициент модального демпфирования,

$\omega_i^2 = \frac{k_i}{m_i}$  – модальная частота.

Величина модального демпфирования может быть задана непосредственно в соответствии с частотой. В таком случае величина модального демпфирования добавляется к модальной матрице демпфирования  $\Phi^T C \Phi$ . Таким образом, разделение форм колебаний для уравнения равновесия форм возможно, когда модальная матрица демпфирования  $\Phi^T C \Phi$  является диагональной матрицей, что справедливо, когда коэффициент пропорционального демпфирования и конструктивное демпфирование являются постоянными для каждого элемента, и когда демпфирующие элементы (пружина, демпфер) в модели отсутствуют.

Если в расчете методом суперпозиции форм заданные вынужденные колебания, они могут быть непосредственно учтены в уравнении модальной равновесия. Уравнения равновесия (12) разделяется по степеням свободы с учетом и без учета вынужденных колебаний

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

$u_1$  – перемещение по направлению без ограничения свободы,

$u_2$  – перемещение по степени свободы по направлению вынужденных колебаний,

$f_1$  – нагрузка, которая действует в направлении без ограничения свободы,

$f_2$  – нагрузка соответствует вынужденному колебанию.

Удобный метод представления функции текучести с использованием инвариантов главных напряжений. Напряжения в произвольной точке материала могут быть выявлены с использованием следующего уравнения, дополнительно используя вектор направления  $n_j$ , который определяет направление главных напряжений

$$(\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}) n_j = 0 \quad (19)$$

где  $\delta_{ij}$  – дельта Кронекера.

В приведенном выше уравнении  $n_j \neq 0$ , тогда необходимым и достаточным условием для уравнения (1) является следующее:

$$|\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}| = 0 \quad (20)$$

Матричное уравнение (20) может быть записано для главных напряжений

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0 \quad (21)$$

Инварианты напряжений (первый, второй и третий), входящие в уравнения (21), определяются следующим образом:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_{ij}$$

$$I_2 = (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) - (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = \frac{1}{2}(I_1^2 - \sigma_{ij} \sigma_{ji}) \quad (22)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{ki} + \frac{1}{6} I_1^3$$

Величины  $I_1, I_2, I_3$  могут быть выражены через величины главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ,

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$I_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \quad (23)$$

$$I_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$$

Тензор напряжений  $\sigma_{ij}$  может быть разделен на гидростатическое давление (сферический тензор) и инвариантные компоненты напряжений, как показано ниже

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \sigma_m \delta_{ij} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix}}_{\text{сферический тензор}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_0 & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma_0 & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \sigma_0 \end{bmatrix}}_{\text{девиатор}} \quad (25)$$

$\sigma_m = \frac{(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{3} = \frac{I_1}{3}$  – среднее напряжение. Также  $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}$  девиаторное напряжение, представляющее чистый сдвиг.

Инвариант девиатора напряжений может быть определено с

$$|S_{ij} + s \delta_{ij}| = 0 \quad (26)$$

Уравнение (26) может быть записано в виде:

$$s^3 - J_1 s^2 + J_2 s - J_3 = 0 \quad (27)$$

Величины, которые входят в уравнение (27), определяются следующим образом:

$$J_1 = S_{ii} = S_x + S_y + S_z = 0 \quad (28)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ji} = \frac{1}{6} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (29)$$

$$J_3 = \frac{1}{3} S_{ij} S_{jk} S_{ki} = \begin{vmatrix} S_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & S_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & S_z \end{vmatrix} \quad (30)$$

Величины  $I_1, I_2, I_3, J_1, J_2, J_3$  являются скалярными инвариантами, свойства которых не зависят от направления координатных осей. Для удобства геометрического представления функции текучести часто используются инварианты  $I_1, J_2, J_3$ .

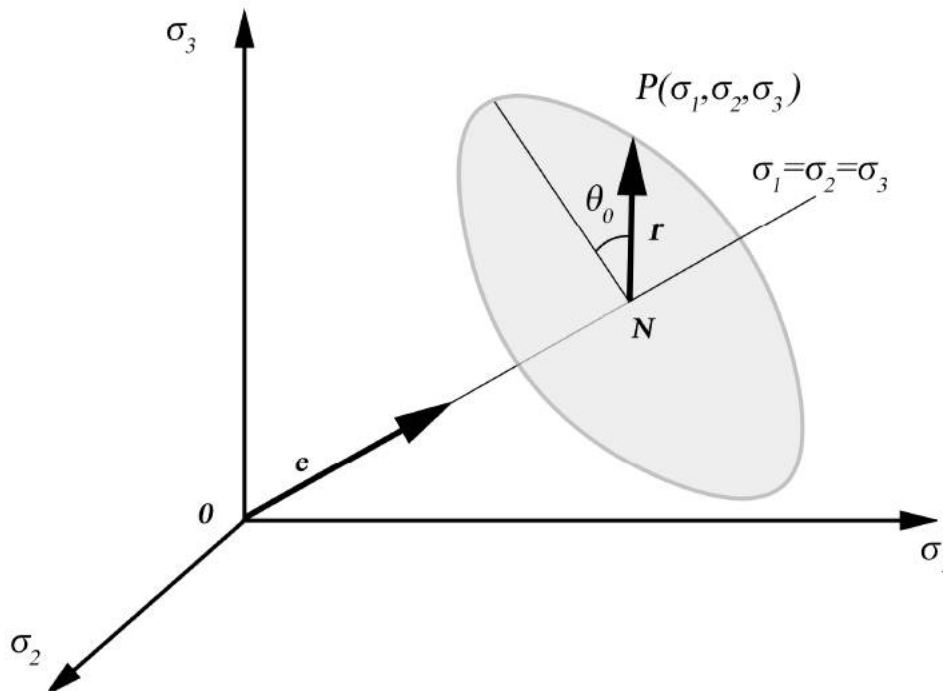


Рис. 1. Определение напряженного состояния в пространстве главных напряжений  
Fig. 1. Determination of the stress state in the principal-stress space

Вектор  $OP$  может быть определено, если точка  $P(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  задана как произвольный напряженное состояние в пространстве главных напряжений, как показано на рис. 1. Вектор  $OP$  может быть поделен на вектор  $ON$ , который направляется по оси гидростатического давления, и вектор  $NP$ , который расположен в девиаторной плоскости, нормальной к оси гидростатического давления. Величины этих векторов следующие: |

$$|ON| = \xi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 \quad (31)$$

$$|NP| = r = \sqrt{2J_2} \quad (32)$$

Вектор  $NP$  должен быть повернут на угол  $\theta_0$  относительно оси  $\sigma_1$  для определения положения точки  $P$  на девиаторной плоскости. В данном случае угол называется углом  $\theta_0$  подобия, и определяется из уравнения:

$$\theta_0 = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left( \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \quad (33)$$

Угол  $\theta_0$  имеет следующие границы:

$$0 \leq \theta_0 \leq \frac{\pi}{3} \quad (34)$$

В расчетах удобнее использовать вместо угла  $\theta_0$ , угол Лоде  $\theta$ , который может быть определен с помощью выражения:

$$\theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left( -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \quad (35)$$

В данном случае угол  $\theta = \theta_0 - \frac{\pi}{6}$  и находится в следующих пределах

$$-\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{6} \quad (36)$$

Конечно, при заданной функции текучести материала удобнее выразить через главные напряжения и инвариант напряжений, с использованием угла Лоде может быть использовано следующее выражение для главных напряжений:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \frac{\sqrt[3]{J_2}}{\sqrt{3}} \begin{Bmatrix} \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin(\theta) \\ \sin\left(\theta + \frac{4}{3}\pi\right) \end{Bmatrix} + \frac{I_1}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (37)$$

Пластические материалы, в отличие от упругих материалов, демонстрируют окончательные деформации даже после снятия внешней нагрузки. Чтобы численно выразить данное свойство материала, деформации выражают в виде суммы приложений, которые представляют собой упругие и пластичные компоненты

$$\varepsilon = \varepsilon^{ei} + \varepsilon^{pi} \quad (38)$$

где  $\varepsilon$  – полная деформация;  $\varepsilon^{ei}$  – упругая деформация;  $\varepsilon^{pi}$  : пластическая деформация.

Так как закон Гука определяет зависимость между деформациями и напряжениями в упругой стадии работы материала, применение его к уравнению (38) после соответствующих преобразований дает следующее выражение для напряжений:

$$\sigma = D\varepsilon^{ei} = D(\varepsilon - \varepsilon^{pi}) \quad (39)$$

где  $\sigma$  – вектор напряжений;  $D$  – матрица жесткости.

Критерии разрушения определяют критерий пластичности и могут быть определены по-разному в зависимости от свойств материалов, таких как сталь или бетон. Критерий разрушения материала может быть в виде функции, построенной на основании экспериментальных данных. В общем, в такую функцию входят переменные, которые представляют напряжение и укрепление:

$$f(\sigma, k) = 0 \quad (40)$$

$f$  – функция текучести;

$k$  – параметр упрочнения.

Если функция текучести  $f$  равна нулю или меньше нуля, пластическая течение не возникает, а если  $f$  больше нуля – пластическое течение возникает.

Разрушение материала вызывает его пластическое течение, которое со своей стороны приводит к перераспределению напряжений, что необходимо для сохранения состояния равновесия. Расчет пластического течения выполняется в нелинейной форме, а формулировка закона пластического течения обычно выполняется в виде прироста функции. Направление напряжений формируется следующим образом:

$$n_i = \frac{\partial f_i}{\partial \sigma} \quad (41)$$

где  $n$  – вектор градиента прироста функции, перпендикуляр к поверхности разрушения;  $i$  – число функций текучести.

Увеличение пластических деформаций может быть разделено на компоненты величины и направление с использованием закона Коттера:

$$\dot{\varepsilon}^p = \sum_{i=1}^n \dot{\lambda}_i \frac{\partial g_i}{\partial \sigma} = \sum_{i=1}^n \dot{\lambda}_i m_i \quad (42)$$

где  $g_i$  – функция пластического потенциала, которая может быть записана  $g_i(\sigma|k)$  с использованием напряжений и переменной укрепление  $k$ , в целом может быть определена по результатам испытаний материала;  $\dot{\lambda}_i$  – пластический множитель, для которого должна выполняться условие Куна-Таккера:

$$f \leq 0, \dot{\lambda}_i \geq 0, \dot{\lambda}_i f = 0 \quad (43)$$

Из приведенного выше условия следует, что пластическое течение не возникает, когда функция  $f$  текучести меньше нуля, а множитель  $\dot{\lambda}_i$  всегда равняется нулю. Когда пластическое течение возникает (множитель  $\dot{\lambda}_i$  больше нуля, функция текучести всегда равняется нулю.  $m$  – вектор, определяющий увеличение пластических деформаций в уравнении (42). В данном случае метод определения увеличения пластических деформаций через отношение  $\frac{\partial f}{\partial \sigma}$ , которое использует функцию текучести  $f$ , а не функцию пластического потенциала  $g$ , называется ассоциированным законом течения. А метод, использующий функцию пластического потенциала для определения увеличения пластических деформаций через отношение  $\frac{\partial g}{\partial \sigma}$ , называется не-ассоциативным законом течения. Использование не-ассоциативного закона течения для модели материала может привести к подавлению явления чрезмерного объемного расширения вследствие различия направления действия напряжения и деформаций. Однако объем вычислений при этом возрастает через асимметричные матрицы жесткости и необходимости использования асимметричного решения.

Переменная упрочнения  $k$ , используемая для описания деформационного упрочнения, может быть определена с использованием безразмерных эквивалентных пластических деформаций, как изображено ниже:

$$k = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon^p)^T Q \varepsilon^p} \quad (44)$$

В данном уравнении величина  $\varepsilon^p$  определяется следующим образом:

$$\varepsilon^p = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^p \\ \varepsilon_{yy}^p \\ \varepsilon_{zz}^p \\ \gamma_{xy}^p \\ \gamma_{yz}^p \\ \gamma_{zx}^p \end{Bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Уравнение состояния для пластической стадии работы материала может быть получено следующим образом. Прирост напряжений определяется упругой составляющей вектора увеличения деформаций.

$$\dot{\sigma} = D(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^p) = D\dot{\varepsilon} - \lambda Dm \quad (46)$$

Так как текущие напряжения всегда должны принадлежать поверхности разрушения, должно выполняться условие общности  $\dot{\lambda} \dot{f} = 0$ . Преобразование уравнения (46) для малого прироста деформаций позволит получить:

$$\dot{\sigma} = \left( D - \frac{Dmn^T D}{h + n^T Dm} \right) \dot{\varepsilon} = D^{ep} \dot{\varepsilon} \quad (47)$$

Величина  $D^{ep}$  в уравнении (47) называется тангенциальной матрицей жесткости.

При использовании согласованной тангенциальной матрицы жесткости рекуррентная формула Ньютона-Рафсона сходится скорее, чем при использовании уравнения (47), из-за свойства сходимости второго порядка. Такое свойство сходимости второго порядка может быть получено следующим образом. Во-первых, дифференцируя уравнение (46), получим:

$$\dot{\sigma} = D\dot{\varepsilon} - \dot{\lambda} Dm - \Delta \lambda D \frac{\partial m}{\partial \sigma} \dot{\sigma} - \Delta \lambda D \frac{\partial m \partial k}{\partial k \partial \lambda} \dot{\lambda} \quad (48)$$

где  $\dot{\lambda}$  – производная величины  $\Delta \lambda$ .

Тогда уравнение (47) может быть переписано в виде:

$$A\dot{\sigma} = D\dot{\varepsilon} - \lambda D\bar{m} \quad (49)$$

Уравнение (49) обеспечивает лучшую сходимость расчета.

Для определения нестационарного отклика используется прямое интегрирование во времени и суперпозиция форм, относительно линейного уравнения движение (12).

Для неявного прямого интегрирования используется метод предложенный Гилбером, Хьюзом и Тейлором (Hilber, Hughes, Taylor).

Метод ННТ- $\alpha$  представляет собой общую форму метода Ньюмарка и учитывает числовой коэффициент демпфирования. Данный подход имеет точность второго порядка для шагов по времени, как и метод Ньюмарка, и с его помощью можно контролировать высокочастотный шум. Метод ННТ- $\alpha$  использует следующее модифицированное уравнение равновесия:

$$Ma^{n+1} + (1 + \alpha_H) [Cv^{n+1} + f^{int,n+1} - f^{ext,n+1}] - \alpha_H [Cv^n + f^{int,n} - f^{ext,n}] = 0 \quad (50)$$

где  $a^{n+1}$  и  $v^{n+1}$  – является вектором ускорения и скорости на  $n+1$  шаге, а  $\alpha_H \in \left[-\frac{1}{3}, 0\right]$  – коэффициент,

учитывающий демпфирования системы гашения колебаний вследствие рассеяния энергии. Если в системе возникают немеханические деформации, такие как внутренние силы, связанные с начальными напряжениями и поровым давлением, внешние силы можно выразить с помощью следующего уравнения, произведения матрицы жесткости на степень свободы:

$$f^{int,n+1} = Ku^{n+1} - f^{nonmech,n+1} + f^{int,0} \quad (51)$$

Скорость и перемещение на соответствующем шаге  $n$ ,  $n+1$  могут быть описаны с помощью использования нестационарного уравнения метода Ньюмарка в следующем виде:

$$v^{n+1} = v^n + \Delta t [\gamma a^{n+1} + (1 - \gamma) a^n] \quad (52)$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t v^n + \frac{1}{2} \Delta t^2 [2\beta a^{n+1} + (1 - 2\beta) a^n] \quad (53)$$

Переписав уравнение равновесия (19) с учетом уравнений (20), (21) и (22), получим следующую систему уравнений в момент времени  $n+1$ , где перемещение выступают в качестве переменной:

$$K^{eff} u_{n+1} = f^{eff} \quad (54)$$

$$K^{eff} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} M + \frac{(1 + \alpha_H) \gamma}{\beta \Delta t} C + (1 + \alpha_H) K \quad (55)$$

$$K^{eff} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} M + \frac{(1 + \alpha_H) \gamma}{\beta \Delta t} C + (1 + \alpha_H) K$$

$$\begin{aligned} f^{eff} = & -f^{int,0} + (1 + \alpha_H) [f^{ext,n+1} + f^{nonmech,n+1}] - \alpha_H [f^{ext,n} + f^{nonmech,n}] \\ & + M \left[ \frac{1}{\beta \Delta t^2} u^n + \frac{1}{\beta \Delta t} v^n + \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) a^n \right] + \\ & + C \left[ \frac{(1 + \alpha_H) \gamma}{\beta \Delta t} u^n + \left\{ \frac{(1 + \alpha_H) \gamma}{\beta} - 1 \right\} v^n + \Delta t (1 + \alpha_H) \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) a^n \right] + \alpha_H Ku^n \end{aligned} \quad (56)$$

Правая часть  $f^{eff}$  в системе уравнений (23) определяется для внутренних сил и перемещений на шаге по времени  $n$ . Когда правая часть выражения определена, вектор перемещений  $u_{n+1}$  в момент времени  $n+1$  определяется с помощью решения системы уравнений. Скорость и ускорение в момент времени  $n+1$  определяются с помощью нестационарных уравнений Ньюмарка (21) и (22). Нестационарный отклик сооружения получаем путем интегрирования во времени, состоящем в повторе расчетов.

Эффективная матрица жесткости  $K^{eff}$  в левой части уравнения (23) повторно использует каждый раз разложенную матрицу при расчете с постоянным шагом по времени, обеспечивая эффективность расчета с помощью одного только процесса прямой и обратной подстановки.

При  $y = \frac{(1-2\alpha_H)}{2}$ ,  $\beta = \frac{(1-\alpha_H)^2}{4}$ , и при  $\alpha_H = 0$  метод показывает абсолютную стабильность.

Данный метод является модификацией метода Ньюмарка с использованием среднего ускорения. Используется значение по умолчанию  $\alpha_H = 0.05$ .

В GTS NX реализован учет двух видов демпфирования: по массе и жесткости демпфирования. Реализован также учет демпфирования по формам колебаний, которое применяется только при суперпозиции форм, как описано выше. Эффект демпфирования в линейном нестационарном расчете учитываются с помощью матрицы жесткости  $C$  в следующей форме:

$$C = \alpha_j^e M_j^e + \beta_j^e K_j^e + B \quad (57)$$

где  $\alpha_j^e$  – коэффициент демпфирования для  $j$ -го элемента с массой;  $\beta_j^e$  – коэффициент демпфирования для  $j$ -го элемента по жесткости;  $M_j^e$  – матрица масс  $j$ -го элемента;  $K_j^e$  – матрица жесткости  $j$ -го элемента;  $B$  – матрица демпфирования демпфирующего элемента (демпфера).

Для выполнения интегрирования по времени с использованием суперпозиции форм колебаний, масса в уравнении равновесия форм (14) задается равным единице, и уравнение принимает следующий вид:

$$\ddot{\xi}_i(t) + \bar{C}_{ij} \dot{\xi}_i(t) + \omega_i^2 \xi_i(t) = p_i = p_i(t - \Delta t) + \frac{\Delta p_i}{\Delta t} t \quad (58)$$

$$\bar{C}_{ij} = [\bar{C}]_{ij} = [\Phi^T C \Phi]_{ij} \quad (59)$$

Когда заданы начальные перемещения и скорости, начальное перемещение  $\xi_i^0$  и начальная скорость  $\dot{\xi}_i^0$  в модальной системе координат определяется следующим образом. При этом использование всех форм колебаний позволяет получить точное уравнение, а использование части форм дает приближенную зависимость:

$$\xi_i^0 = \frac{1}{m_i} \phi_i^T M u_0 \quad (60)$$

$$\dot{\xi}_i^0 = \frac{1}{m_i} \phi_i^T M v_0 \quad (61)$$

где  $\phi_i$  –  $i$ -я форма колебаний;  $u_0$  – начальное перемещение;  $v_0$  – начальная скорость.

Нелинейное решение для метода конечных элементов представляет собой метод приведения к корректному решению накопленных пошаговых решений, полученных путем итерационных вычислений-рис. 2.

На рис. 2. величины  ${}^t f_{ext}$  и  ${}^{t+\Delta t} f_{ext}$  представляют собой внешние силы в моменты времени соответственно  $t$  и  $t+\Delta t$ , при этом развязок и пошаговое решение между моментами времени  $t$  и  $t+\Delta t$  может быть описано следующим выражением:

$$(62)$$

где  $\Delta u$  – развязок для прироста времени  $\Delta t$ .

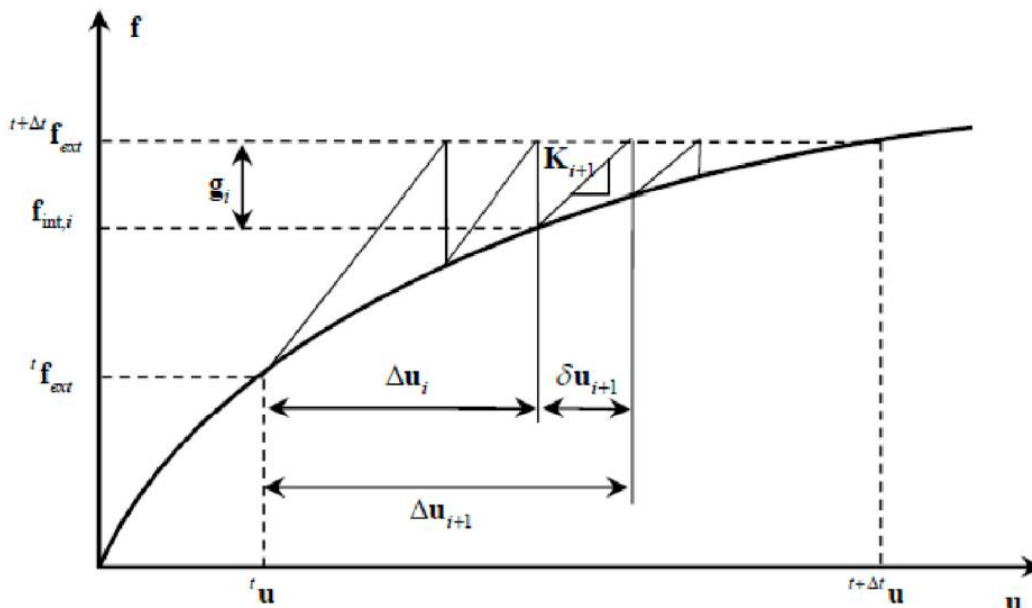


Рис. 2. Пошаговый метод и нелинейное конечно-элементное сближение  
Fig. 2. Step-by-step method and nonlinear finite element convergence

Если выполняются итерационные вычисления для нелинейного расчета при приросте времени  $\Delta t$ , то накопленное пошаговое решение определяется следующим образом:

$$\Delta u = \sum_{i=1}^n \delta u_i \text{ или } \Delta u_{i+1} = \Delta u_i + \delta u_{i+1} \quad (63)$$

где  $\Delta u_i$  – накопленный пошаговый развязок на  $i$ -м шаге;  $\delta u_{i+1}$  – шаговые решения на  $i + 1$  шаге;  $\delta u_{i+1}$  – определяется путем решения линейной системы уравнений с использованием тангенциальной матрицы жесткости  $K_{i+1}$ .

$$\delta u_{i+1} = K_{i+1}^{-1} g_i \quad (64)$$

где  $g_i$  – показатель невязки, несбалансированная сила.

Несбалансированная сила  $g_i$  определяется как разница между внешней силой  $f_{ext}^{t+\Delta t}$  и внутренним усилиям  $f_{int,i}$ .

$$g_i = f_{ext}^{t+\Delta t} - f_{int,i} \quad (65)$$

Уравнение (65) решается итерационно до тех пор, пока не удовлетворяется заданное условие сходимости, который определяется в терминах усилия в элементе, перемещения или энергии.

Также реализована функция линейного поиска для улучшения совпадения основных итерационных вычислений, описанных выше. Фундаментальная концепция линейного поиска заключается в использовании скалярной величины  $\eta$  в процессе сборки численного шагового решение  $\delta u_{i+1}$  с накопленным итерационным решением с целью повышения точности. При этом накопленное итерационное решение вычисляется, как:

$$\Delta u_{i+1} = \Delta u_i + \eta \delta u_{i+1} \quad (66)$$

Считая, что численная таким образом величина  $\Delta u_{i+1}$  удовлетворяет условию равновесия и использует принцип неизменности полной потенциальной энергии, задача линейного поиска сводится к нахождению такого значения  $\eta$ , при котором производная полной потенциальной энергии для  $\eta$  равна нулю:

$$s(\eta) = \delta u_{i+1}^T g(\eta) = 0 \quad (67)$$

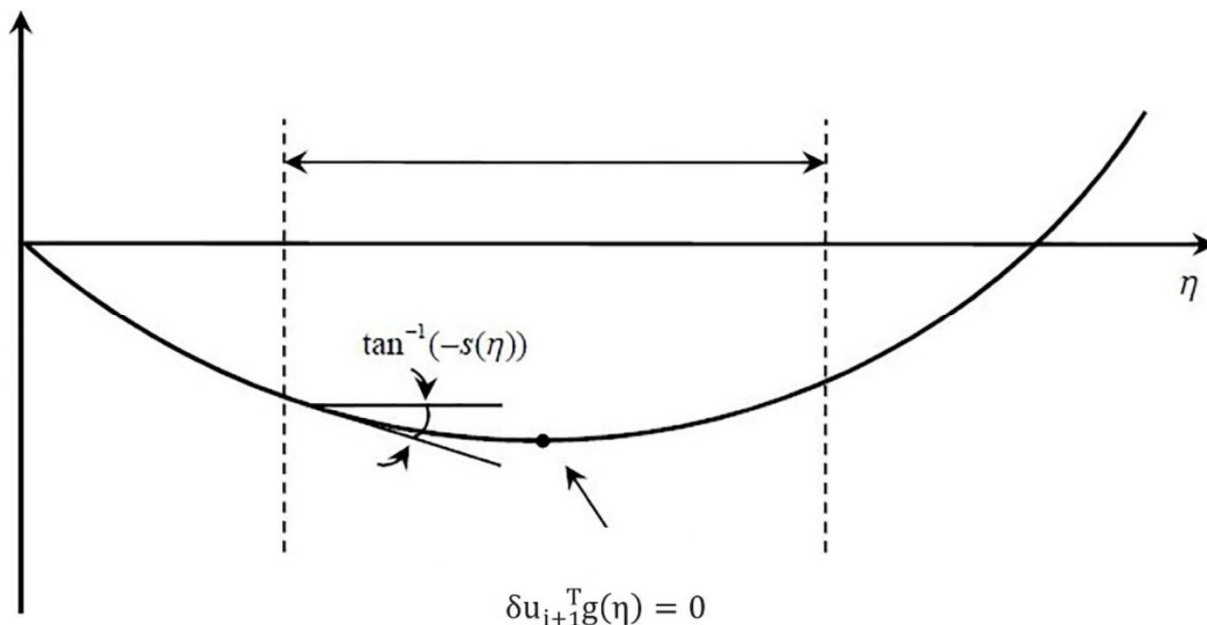


Рис. 3. Концептуальная диаграмма алгоритма линейного поиска  
Fig. 3. Conceptual diagram of the linear search algorithm

Полагая, что производная энергии линейно зависит от  $\eta$ , значение  $\eta$ , удовлетворяющее уравнению (67) вычисляется следующим образом:

$$\eta = \frac{-s(\eta = 0)}{s(\eta = 1) - s(\eta = 0)} \quad (68)$$

где наклон касательной в точках, в которых значение  $\eta$  равно нулю или единице, определится следующим образом:

$$s(\eta = 0) = \delta u_{i+1}^T T_{g_i} \quad (69)$$

$$s(\eta = 1) = \delta u_{i+1}^T T_{g_{i+1}} \quad (70)$$

Так как предположения, что используются в алгоритме линейного поиска, не является точным для реальных задач, то значение  $s(\eta)$ , вычисленное с использованием уравнения (40), обычно не равна нулю.

Описанные выше процессы повторяются до тех пор, пока значение  $\frac{s(\eta_j)}{s(\eta = 0)}$  не окажется меньше

определенной пользователем константы.

К итерационным методам нелинейного анализа относятся методы начальной жесткости Ньютона-Рафсона, и модифицированный метод Ньютона-Рафсона, которые отличаются точкой вычисления тангенциальной жесткости. В методе начальной жесткости используется постоянное значение тангенциальной жесткости, вычисленное в начальной точке расчета. В методе Ньютона-Рафсона тангенциальная жесткость перечисляется для каждого итерационного вычисления. В модифицированном методе Ньютона-Рафсона тангенциальная жесткость перечисляется в случае изменения внешней силы. Так как вычисления тангенциальной жесткости, расчет матрицы и разложения матрицы требуют значительного времени, то метод постоянной жесткости и модифицированный метод Ньютона-Рафсона при отсутствии проблем сходимости решения позволяют решать задачи быстрее, чем с использованием метода Ньютона-Рафсона.

Сходимость итерационного решения может определяться с использованием: силового критерия, критерия по перемещениям и энергетического критерия.

$$\text{Критерий сходимости силовой} = \frac{\sqrt{\mathbf{g}_i^T \mathbf{g}_i}}{\sqrt{\Delta \mathbf{u}_{int,i}^T \Delta \mathbf{f}_{int,i}}} \quad (71)$$

$$\text{Критерий сходимости по перемещениям} = \frac{\sqrt{\delta u_i^T \delta u_i}}{\sqrt{\Delta u_i^T \Delta u_i}} \quad (72)$$

$$\text{Критерий сходимости по амплитуде энергии} = \left| \frac{\delta u_i^T g_i}{\Delta u_i^T \Delta f_{int,i}} \right| \quad (73)$$

Для обычных нелинейных систем все критерии сходимости снижаются одновременно при сходимости системы. В частности, силовой критерий представляет собой значение несбалансированной силы и находится в тесной взаимосвязи со степенью нелинейного уравнения. С другой стороны, критерий по перемещениям представляет размер пошагового решения и не подходит на роль единого критерия сходимости для задач с очень большой локальной жесткостью.

Для определения сходимости выполняется сравнение одного критерия или группы используемых критериев с заданными пользователями значениями.

Диагностика расхождения является важным критерием, который используется при автоматическом пересчете тангенциальной жесткости, при этом степень расхождения определяется следующим образом:

$$E_i = \frac{\delta u_i^T g_i}{\delta u_i^T g_{i-1}} \quad (74)$$

Когда абсолютное значение величины степени расхождения больше единицы ( $|E_i| \geq 1$ ), считается, что возможно расхождение решения нелинейной задачи, что ведет к необходимым корректировкам алгоритма, а именно пересчет матрицы жесткости или бисекция нагрузки. Метод бисекции или метод деления отрезка пополам – простейший численный метод для решения нелинейных уравнений вида  $f(x)=0$ . Предполагается только непрерывность функции  $f(x)$ . Поиск основывается на теореме о промежуточных значениях.

Бисекция нагрузки применяется в том случае, когда текущий шаг увеличения нагрузки слишком велик для сходимости решения, то есть когда решение расходится, или когда необходимое число итеративных вычислений более чем задано. Соответствующая величина прироста нагрузка может быть подобрана путем перезапуска итеративного вычисления с бисекции текущего увеличения нагрузки.

Приближенный метод Ньютона представляет собой тип нелинейного решения, который является обобщенной формой метода секущей. Данному методу свойственны преимущества модифицированного метода Ньютона-Рафсона, в соответствии с которым пересчет матрицы жесткости выполняется только при наличии увеличения нагрузки. Другими словами, не тратится время на пересчет матрицы жесткости во время итераций, что повышает эффективность решения. Таким образом, данный метод позволяет повысить общую эффективность расчета.

Используется метод BFGS (Бройде-Флетчера-Голдфарба-Шенно) как разновидность приближенного метода Ньютона. Обратная матрица, определенная на основе матрицы жесткости при итерационных вычислениях в рамках нелинейного расчета корректируется согласно следующей последовательности операций метода BFGS.

$$K_j^{-1} = \Gamma_j^T K_{j-1}^{-1} \Gamma_j + z_j \delta_j \delta_j^T \quad (75)$$

где  $j$  представляет собой номер коррекции методом BFGS, а матрица  $\Gamma_j$  и скаляр  $z_j$  могут быть описаны следующими выражениями:

$$\Gamma_j = I - z_j \delta_j \delta_j^T \quad (76)$$

$$z_j = \frac{1}{\delta_j^T \gamma_j} \quad (77)$$

Также векторы  $\delta_j$  и  $\gamma_j$  в приближенном методе Ньютона определяются с помощью пошагового решения  $\delta u_i$ , которое использует коэффициент линейного поиска  $\eta$   $i$ -го итерационного вычисления, и разницу между несбалансированными силами при исчислении итерационном:

$$\delta_j = \Delta u_i - \Delta u_{i-1} = \eta \delta u_i \quad (78)$$

$$\gamma_j = g_i - g_{i-1} \quad (79)$$

Решение на  $i$ -й итерации определяется с использованием  $j$ -й скорректированной матрицы жесткости и несбалансированных сил метода BFGS

$$\delta u^i = K_j^{-1} g^{i-1} = \Gamma_j^T K_{j-1}^{-1} \Gamma_i g^{i-1} - z_j \delta_j \delta_j^T g^{i-1} \quad (80)$$

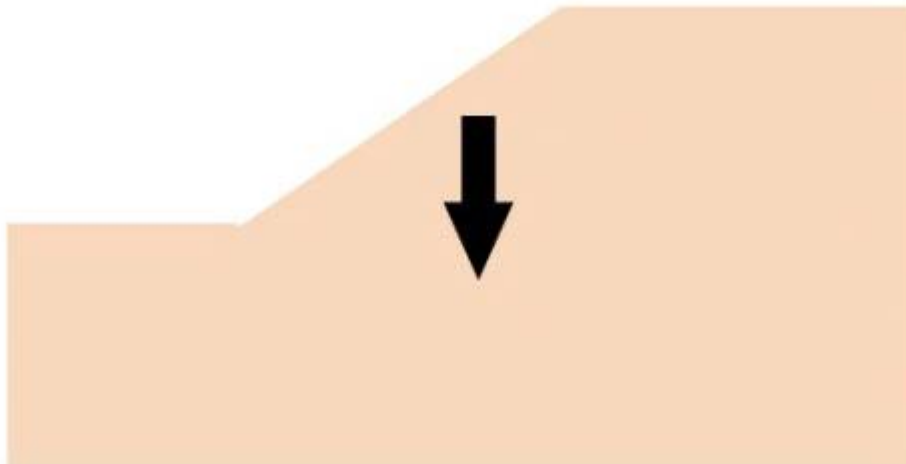
Обратная матрица, вычисленная на основе матрицы жесткости, на самом деле не корректируется процедурой метода BFGS; шаговые решения вычисляются при итерации с использованием рекурсивного метода. Другими словами, сохраняется разложенная форма начальной матрицы жесткости без коррекции со стороны метода BFGS. Решение на каждом шагу может быть найдено с использованием простых рекурсивных векторных операций. Для таких операций сохраняется квазиньютоновский вектор. Квазиньютоновский вектор удаляется, когда пошаговый расчет сходится и выполняется составление матрицы жесткости.

Склон всегда обладает потенциальной энергией собственного веса вследствие действия силы тяжести; и если склон подвергается действиям внешних воздействий, таких как поровое давление, внешние нагрузки, сейсмические воздействия, воздействие волн и т.д., Это значительно снижает устойчивость склона. Обрушение склона может произойти, если активная сила, действующая на склон, больше силы сопротивления почвы. В расчете устойчивости склона оценивается устойчивость склона против обрушения с использованием соотношения между активной силой и силой сопротивления.

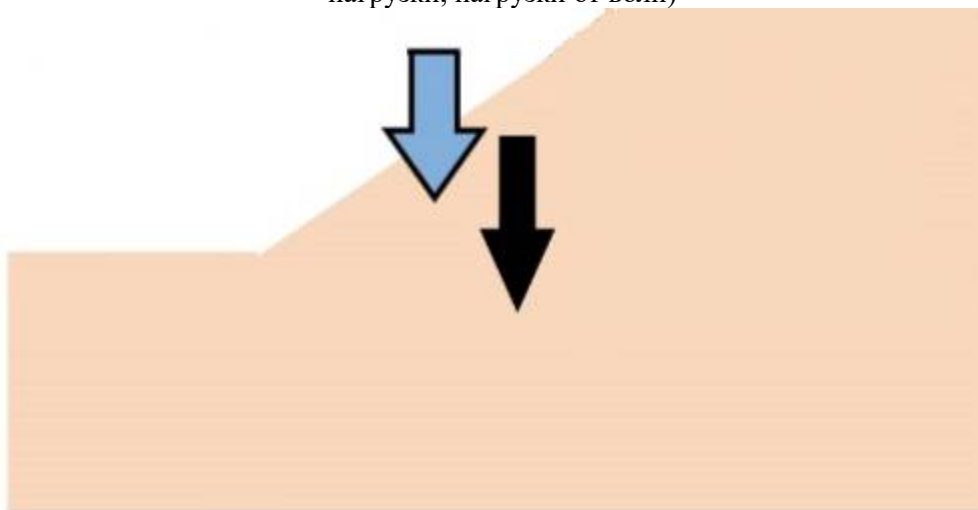
Широко известный метод предельного равновесия подходит только для оценки устойчивости в базовых условиях. Реальные оползни склона сопровождаются большими локальными перемещениями, на границе которых происходит оползень. Поэтому для расчетов устойчивости сооружений важно использовать метод расчета, который в состоянии непрерывно отслеживать деформированную схему сооружения, начиная от появления начальных перемещений и вплоть до сдвига. В последнее время ведутся активные исследования в области применения метода конечных элементов как метода оценки устойчивости (обрушение склона) с использованием величины прочности конечных элементов, что позволяет легко отслеживать деформированную схему сооружения при различных граничных условиях и схемах нагрузки.

Алгоритм определения коэффициента надежности отвеса представлен на рис. 4:

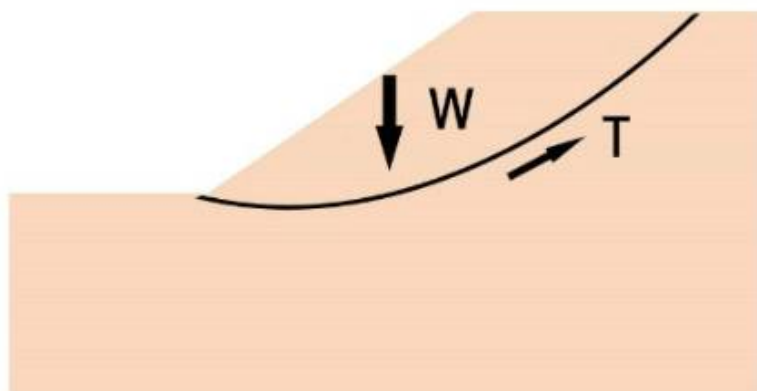
- Шаг 1. Склон в состоянии покоя, до приложения нагрузок и воздействий.



- Шаг 2. Приложения внешних воздействий (поровое давление воды, нагрузки на склон, сейсмические нагрузки, нагрузки от волн)



- Шаг 3. Определение касательных напряжений в склоне



- Шаг 4. Определение коэффициента надежности, как отношение силы сопротивления к силам, сдвигают.

$$\text{Коэффициент надежности} = \frac{\text{Сила сопротивления}}{\text{Сдвигающие силы}}$$

Рис. 4. Алгоритм определения коэффициента надежности отвеса  
Fig. 4. Algorithm for determining the plumb line reliability coefficient

В инженерной практике используются следующие методы оценки устойчивости склонов:

- 1) Методы предельного равновесия;
- 2) Метод конечных элементов, основанный на упруго-пластической теории (метод редукции и метод анализа напряжений).

Расчет устойчивости склона с использованием метода конечных элементов является детальным приближенным решением, удовлетворяющим всем условиям равновесия сил, условия общности, уравнения состояния и предельные условия в каждой точке склона. Данный метод численного анализа позволяет моделировать близкую к реальной форме сдвига, лучше учитывая реальные условия работы сооружения. При этом достаточно точно может быть оценен механизм обрушения и минимальный коэффициент безопасности склона. В частности, процесс разрушения моделируется автоматически, без необходимости предварительной задачи возможной поверхности разрушения.

Метод редукции (метод расчета устойчивости склона, основанный на методе конечных элементов) состоит в постепенном снижении прочности и выполнении расчета напряженно-деформированного состояния пока решение не перестанет сходиться. Такая ситуация соответствует обрушению склона, а максимальный коэффициент снижения сдвижной прочности считается минимальным коэффициентом устойчивости склона. Данный метод расчета является достаточно затратным, так как требует

многократного выполнения нелинейного расчета, но при этом он позволяет получить более точные результаты за приемлемое время, если пользователь владеет ведущими вычислительными ресурсами. Кроме того, метод редукции позволяет рассмотреть процесс деформирования откоса от его начального положения до момента обрушения без необходимости указания возможных положений поверхности обрушения.

Для моделирования разрушения склона используется метод редукции, при этом коэффициент безопасности вычисляется в произвольной точке, в которой круг Мора соприкасается с поверхностью разрушения, как показано на рис. 5. Напряженное состояние в данной точке может быть определено как состояние разрушения, и когда такая точка разрушения распространяется, происходит обрушение откоса. Конечно, элементное решение при этом расходится, и коэффициент безопасности при этом считается минимальным коэффициентом запаса.

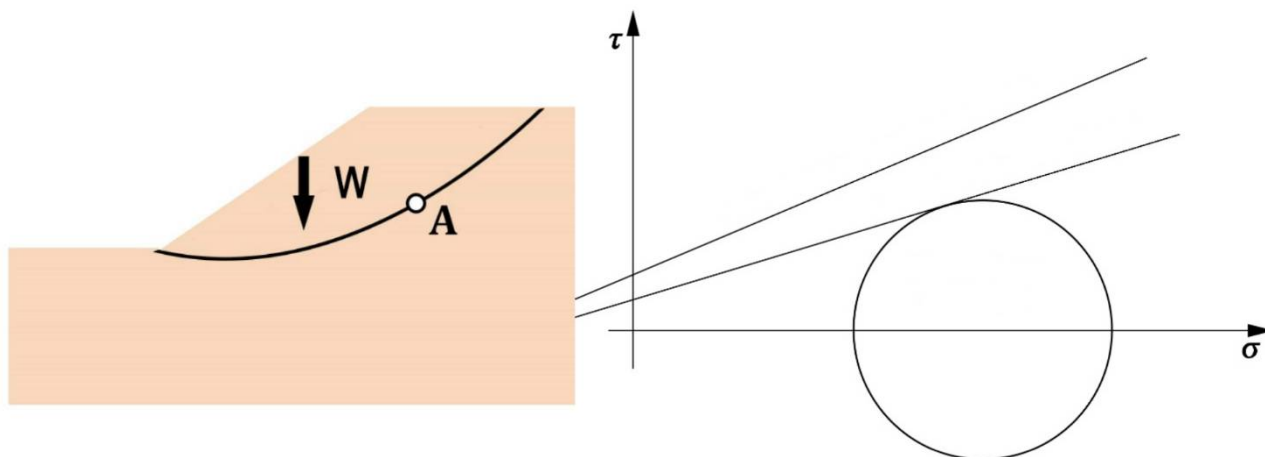


Рис. 5. Метод редукции  
Fig. 5. Reduction method

В расчетах методом редукции используются следующие модели материалов: модель Мора-Кулона, Друкера-Прагера и модифицированная модель Мора-Кулона. Все параметры в этих моделях считаются постоянными величинами, кроме сцепления, угла внутреннего трения и угла дилатансии, которые определяют разрушение при сдвиге. Значения сцепления, угла внутреннего трения и угла дилатансии, описывающие элементы грунта (элементы плоской деформации, осе симметричные, твердо тельные), постепенно снижаются, таким образом, вычисляется коэффициент надежности при разрушении склона:

$$F_s = \frac{\tau}{\tau_f} \quad (81)$$

где  $\tau$  – прочность при сдвиге материала склона, которая может быть определена следующим образом с использованием теории Мора-Кулона:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (82)$$

$\tau_f$  – касательные напряжения в активной плоскости, определяемые следующим образом:

$$\tau_f = c_f + \sigma_n \tan \phi_f \quad (83)$$

$c_f = \frac{c}{SRF}$  – удельное сцепление в точке на активной плоскости;

$\phi_f = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \phi}{SRF} \right)$  – угол внутреннего трения в точке на активной плоскости;

SRF – коэффициент редукции.

В методе редукции величина коэффициента редукции SRF в момент, предшествующий расхождению решения соответствует коэффициенту безопасности. Поэтому коэффициент безопасности может несколько отличаться в зависимости от заданных пользователем параметров и критериев сходимости.

Метод предельного равновесия является одним из наиболее распространенных методов анализа устойчивости существующих склонов. Однако в рамках данного метода невозможно определить историю

напряженно-деформированного состояния существующего склона или учесть изменения в поведении почвы. С другой стороны, в расчетах устойчивости склонов с использованием метода конечных элементов есть возможность учесть процесс формирования склона и различные характеристики грунта, но это требует большего времени на расчеты в связи с необходимостью выполнения нескольких нелинейных расчетов. В рамках данного метода коэффициент безопасности высчитывается для заданных поверхностей сдвига с использованием результатов расчета напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. По результатам расчетов определяется критическая кривая сдвига и минимальный коэффициент надежности. При этом может использоваться модель материала Мора-Кулона, Друкера-Прагера и модифицированная модель Мора-Кулона, как и в расчетах методом редукции.

Коэффициент надежности:

$$F_s = \frac{\int_s \tau_f d\Gamma}{\int_s \tau_m d\Gamma} \quad (84)$$

где  $\tau_m$  – определены в результате расчета касательные напряжения;  $\tau_f$  – прочность при сдвиге, которая для модели материала Мора-Кулона исчисляется за

$$\tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (85)$$

где нормальные к поверхности сдвига напряжения  $\sigma_n$  определяются следующим образом:

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (86)$$

где  $\theta$  – угол наклона поверхности сдвига к горизонту;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – нормальные напряжения по направлениям x и y соответственно;  $\tau_{xy}$  – касательные напряжения.

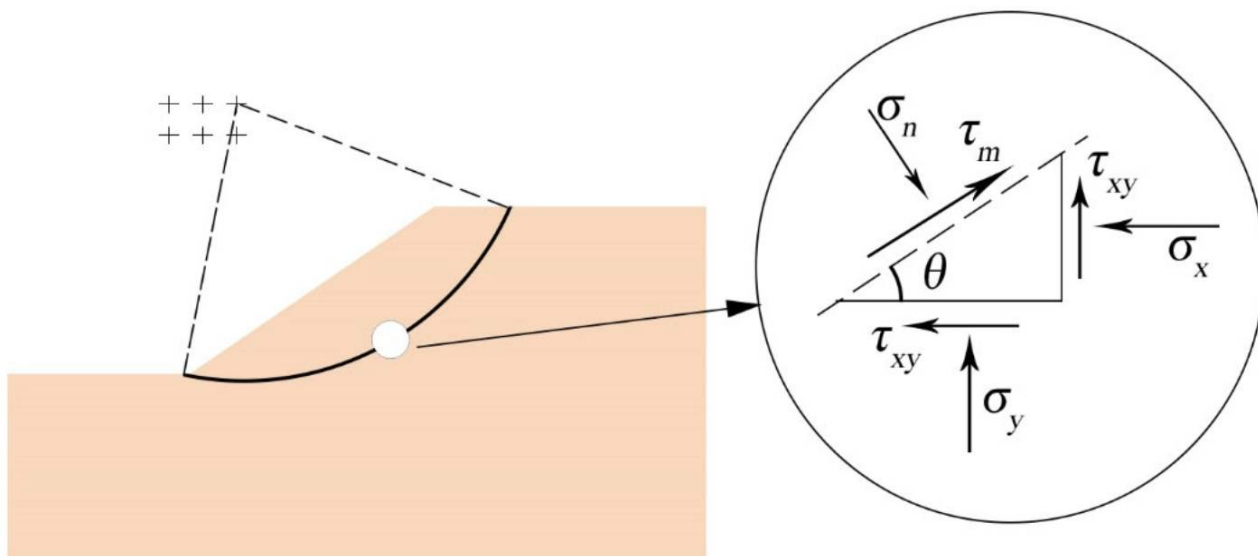


Рис. 6. Метод анализа напряжений  
Fig. 6. Stress analysis method

Для определения коэффициента надежности необходимо вычислить линейный интеграл напряжений вдоль виртуальной поверхности сдвига. Для этого необходимо знать величины напряжений в любой точке. Напряжения вычисляются как сумма произведений узловых напряжений на функцию формы в данной точке:

$$\sigma = \sum_{i=1}^{node} N_i \sigma_i^{node} \quad (87)$$

где  $N_i$  – функция формы в  $i$ -м узле;  $\sigma_i^{node}$  – напряжение в  $i$ -м узле;  $\sigma$  – напряжение в произвольной точке внутри элемента.

Интеграл напряжений вдоль виртуальной поверхности смещения для плоской задачи в глобальной системе координат превращается в интеграл в одномерной локальной системе координат и вычисляется с помощью следующего уравнения:

$$\int_{n1}^{n2} \tau(x, y) d\Gamma = \frac{L}{2} T \int_{-1}^1 \tau(\xi) d\xi = \frac{L}{2} T \sum_{i=1}^{n_{mi}} W_i \tau(\xi_i) \quad (88)$$

где  $\xi$  – переменная координаты в локальной системе координат;  $W_i$  – константа интегрирования в  $i$ -й точке интегрирования;  $T$  – матрица преобразования, которая преобразует напряжение из локальной системы координат в глобальную;  $L$  – длина элемента;  $T$  – касательные напряжения  $\tau_m$  или  $\tau_f$  прочность при сдвиге по виртуальной поверхности сдвига.

Коэффициент надежности для заданной виртуальной поверхности сдвига определится следующим образом:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n_{el}} \int_{n1}^{n2} \tau_f d\Gamma}{\sum_{i=1}^{n_{el}} \int_{n1}^{n2} \tau_m d\Gamma} \quad (89)$$

где  $n_{el}$  – число элементов на виртуальной поверхности сдвига;  $n_1$  – начальная точка в пределах элемента на виртуальной поверхности сдвига;  $n_2$  – конечная точка в пределах элемента на виртуальной поверхности сдвига.

Метод анализа напряжений, основанный на методе предельного равновесия, использует поле напряжений, определенное методом конечных элементов, и виртуальную поверхность сдвига метода предельного равновесия. По сравнению с методом редукции, данный метод требует значительно меньшего времени вычислений, при этом в расчете могут быть учтены различные элементы армирования склона без дополнительных приближений.

### Выводы

Анализ состояния использования и перспектив развития технологии информационного моделирования свидетельствует, что все преимущества от внедрения можно оценить лишь в случае использования информационной модели во время эксплуатации сооружений. Разработана методика определения количества и качества информации в информационной модели здания с использованием принципов обработки и хранения информации. Предложенные алгоритмы и методы позволяют определить оптимальное количество параметров для обеспечения надежности во время эксплуатации. Анализ напряженно-деформированного состояния сооружений требует использования усовершенствованных моделей деформирования почвы, которые точнее аппроксимируют соотношение напряжений и деформаций и учитывают укрепление и разрежение почвы. Приведены рекомендации по использованию моделей грунтов для расчета методом конечных элементов с учетом вида грунта и типа расчета, что помогают уменьшить вероятность ошибок.

### Литература

1. Chen G., Su G. Deformation information management of underground engineering based on data mining technology // In ICIME 2010-2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering. 2010. Vol. 6. P. 140 – 143. <https://doi.org/10.1109/ICIME.2010.5478295>
2. Gao L.L., Wu S.C., Fan G.L., Wang Y.H. Research on large deformation mechanism and its control of a loess tunnel entrance. In Rock Mechanics: Achievements and Ambitions – Proceedings of the 2nd ISRM International Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics. 2012. P. 615 – 620.
3. He Y.-J., Chen T., Han L. An automatic monitoring method of slope deformation in open-pit mine based on bp neural network and gis technology // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. 2020. № 14. P. 353 – 360. <https://doi.org/10.46300/9106.2020.14.48>
4. Li C., Deng H., Chen G., Wang S., Guo Y., Wu S. Technology and application of 3D tunnel information monitoring. In Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2015. Vol. 9794. <https://doi.org/10.1117/12.2202347>
5. Li L., Li S., Zhao Y., Wang H., Liu Q., Yuan X., Zhang, Q. Spatial deformation mechanism and load release evolution law of surrounding rock during construction of super-large section tunnel with soft broken surrounding rock masses // Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2012. № 31 (10). P. 2109 – 2118.

6. Liu B., Zhang D., Xi P. Review on design, construction, stress and deformation characteristics of asymmetrically loaded deep excavation [偏压基坑工程设计, 施工与受力变形特性研究进展] // Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao/Journal of China University of Mining and Technology. 2018. № 47 (4). P. 791 – 804.
7. Liu X., Shu Y., Gu K. Design for informatization construction technology in geotube embankment engineering and its preliminary practices [管袋坝信息化施工设计与初步实践] // Advances in Science and Technology of Water Resources. 2018. № 38 (1). P. 44 – 49. <https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2018.01.006>
8. Ma D.L., Cui J., Wang S.Y. Application and research of 3D laser scanning technology in steel structure installation and deformation monitoring. Applied Mechanics and Materials. 2014. 580–583. 2838–2841. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.2838>
9. Ma S. Three-dimensional Laser Combined with BIM Technology for Building Modeling, Information Data Acquisition and Monitoring // Nonlinear Optics Quantum Optics. 2020. № 52 (3-4). P. 191 – 203.
10. Ming G., Zhao Y., Deng P., Guoli W. Key technology of overall structure monitoring of super-huge and profiled steel structure based on FEA simulation and LIDAR // Information Technology Journal. 2013. 12 (18). P. 4576 – 4581. <https://doi.org/10.3923/itj.2013.4576.4581>
11. Nadirov R., Syzdykova L., Zhussupova A. Copper smelter slag treatment by ammonia solution: Leaching process optimization // Journal of Central South University. 2017. № 24 (12). P. 2799 – 2804. <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3694-3>
12. Protsiuk V. (2019). Georadar technologies application during determination of deformation characteristics of subgrade soils. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 708). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012023>
13. Su J., Zhang D., Gao Z., Huang J., Xiao C. Structural deformation and control of subway station constructed by cut and cover reverse method // Zhongguo Tiedao Kexue/China Railway Science. 2010. № 31 (1). P. 59 – 65.
14. Tian L., Hao J., Wang Y. (2009). The analysis of construction mechanical simulation of the large-span steel structure // In 2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2009. Vol. 1. P. 150 – 153. <https://doi.org/10.1109/ICIII.2009.43>
15. Tian T., Pan M., Han X., Cong W., Zhang F., Zhang J. Key technologies of prediction and display of deformation field induced by underground construction // Beijing Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011. № 47 (5). P. 819 – 824.
16. Wu K., Zhang K., Wang C.J., Zhao C. Study on the information processing technology of deformation monitoring data in the underground engineering. Applied Mechanics and Materials. 2013. 353–354, 1555–1558. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.1555>
17. Wu S.L., Deng H.L., Chen K.J., Zhu M.Y., Huang D.H., Fu S.Y. Visual monitoring technology of the tunnel 3D laser scanning and engineering applications // Advanced Materials Research. 2013. № 779. P. 463 – 468. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.463>
18. Yang Y.-J., Yue Z.-R., Wang S. Information construction technology of box-culverts underpass the airport taxiway // Beijing Gongye Daxue Xuebao/Journal of Beijing University of Technology. 2013. № 39 (9). P. 1316 – 1322.
19. Zhang C., Zhang D., Wang M., Huang J. Analysis of stratum deformation induced by overlapping tunnels construction in shallow depth // Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(SUPPL.), 2008. 3244–3250.
20. Zhao L., Chen S. Information monitoring technology for support structure of railway tunnel during operation // SDHM Structural Durability and Health Monitoring. 2018/ № 12 (1). P. 35 – 50. <https://doi.org/10.3970/sdhm.2018.012.035>

### References

1. Chen G., Su G. Deformation information management of underground engineering based on data mining technology. In ICIME 2010-2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering. 2010. 6. P. 140 – 143. <https://doi.org/10.1109/ICIME.2010.5478295>
2. Gao L.L., Wu S.C., Fan G.L., Wang Y.H. Research on large deformation mechanism and its control of a loess tunnel entrance. In Rock Mechanics: Achievements and Ambitions – Proceedings of the 2nd ISRM International Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics. 2012. P. 615 – 620.
3. He Y.-J., Chen T., Han L. An automatic monitoring method of slope deformation in open-pit mine based on bp neural network and gis technology. International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. 2020. 14. P. 353 – 360. <https://doi.org/10.46300/9106.2020.14.48>

4. Li C., Deng H., Chen G., Wang S., Guo Y., Wu S. Technology and application of 3D tunnel information monitoring. In Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2015. 9794. <https://doi.org/10.1117/12.2202347>
5. Li L., Li S., Zhao Y., Wang H., Liu Q., Yuan X., Zhang, Q. Spatial deformation mechanism and load release evolution law of surrounding rock during construction of super-large section tunnel with soft broken surrounding rock masses. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2012. 31 (10). P. 2109 – 2118.
6. Liu B., Zhang D., Xi P. Review on design, construction, stress and deformation characteristics of asymmetrically loaded deep excavation [偏压基坑工程设计, 施工与受力变形特性研究进展]. *Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao/Journal of China University of Mining and Technology*. 2018. 47 (4). P. 791 – 804.
7. Liu X., Shu Y., Gu K. Design for informatization construction technology in geotube embankment engineering and its preliminary practices [管袋坝信息化施工设计与初步实践]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*. 2018. 38 (1). P. 44 – 49. <https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2018.01.006>
8. Ma D.L., Cui J., Wang S.Y. Application and research of 3D laser scanning technology in steel structure installation and deformation monitoring. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 580–583. 2838–2841. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.2838>
9. Ma S. Three-dimensional Laser Combined with BIM Technology for Building Modeling, Information Data Acquisition and Monitoring. *Nonlinear Optics Quantum Optics*. 2020. 52 (3-4). P. 191 – 203.
10. Ming G., Zhao Y., Deng P., Guoli W. Key technology of overall structure monitoring of super-huge and profiled steel structure based on FEA simulation and LIDAR. *Information Technology Journal*. 2013. 12 (18). P. 4576 – 4581. <https://doi.org/10.3923/itj.2013.4576.4581>
11. Nadirov R., Syzdykova L., Zhussupova A. Copper smelter slag treatment by ammonia solution: Leaching process optimization. *Journal of Central South University*. 2017. 24 (12). P. 2799 – 2804. <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3694-3>
12. Protsiuk V. Georadar technologies application during determination of deformation characteristics of sub-grade soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 708. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012023>
13. Su J., Zhang D., Gao Z., Huang J., Xiao C. Structural deformation and control of subway station constructed by cut and cover reverse method. *Zhongguo Tiedao Kexue/China Railway Science*. 2010. 31 (1). P. 59 – 65.
14. Tian L., Hao J., Wang Y. The analysis of construction mechanical simulation of the large-span steel structure. In 2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2009. 2009. 1. P. 150 – 153. <https://doi.org/10.1109/ICIII.2009.43>
15. Tian T., Pan M., Han X., Cong W., Zhang F., Zhang J. Key technologies of prediction and display of deformation field induced by underground construction. *Beijing Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis/* 2011. 47 (5). P. 819 – 824.
16. Wu K., Zhang K., Wang C.J., Zhao C. Study on the information processing technology of deformation monitoring data in the underground engineering. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. 353–354. 1555–1558. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.1555>
17. Wu S.L., Deng H.L., Chen K.J., Zhu M.Y., Huang D.H., Fu S.Y. Visual monitoring technology of the tunnel 3D laser scanning and engineering applications. *Advanced Materials Research*. 2013. 779. P. 463 – 468. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.463>
18. Yang Y.-J., Yue Z.-R., Wang S. Information construction technology of box-culverts underpass the airport taxiway. *Beijing Gongye Daxue Xuebao/Journal of Beijing University of Technology*. 2013. 39 (9). P. 1316 – 1322.

**Koryagina S.A. \*, Business Development Manager,  
OCS Company, Russia**

\*Corresponding author E-mail: [alexem87@yandex.ru](mailto:alexem87@yandex.ru)

## **INFORMATIZATION OF CONSTRUCTION MANAGEMENT AS A BASIS FOR PREVENTING MAN-MADE ACCIDENTS**

**Abstract:** the article presents the principles and algorithms of the finite element method in solving geotechnical problems taking into account seismic impacts for determining the stress-strain state of structures and slope stability, implemented in the Midas GTS NX software package. GTS NX allows you to perform calculations of various types of geotechnical problems and solve complex geotechnical problems in a single software environment. GTS NX covers the entire range of engineering and geotechnical projects, including calculations of the "base-structure" system, deep pits with various mounting options, tunnels of complex shape, consolidation and filtration calculations, as well as calculations for dynamic actions and stability calculations. At the same time, all types of calculations in GTS NX can be performed both in 2D and in 3D. The author does not claim to be the author of the finite element method, but he cannot do without pointing out the basic equations, as this affects the definition of the boundaries of use, the formulation of algorithms for constructing calculation schemes and the analysis of calculation results.

**Keywords:** structure, construction, material deformation, data processing

**Для цитирования:** Корягина С.А. Информатизация управления строительством как основы предотвращения техногенных аварий // Строительные материалы и изделия. 2021. Том 4. № 4. С. 11 – 31. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-4-11-31

**For citation:** Koryagina S.A. Informatization of construction management as a basis for preventing man-made accidents. Construction Materials and Products. 2021. 4 (4). P. 11 – 31. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-4-11-31

*Поступила в редакцию 12 июня 2021 г.*

*Принята в доработанном виде 6 июля 2021 г.*

*Одобрена для публикации 14 августа 2021 г.*

*Received: June 12, 2021.*

*Revised: July 6, 2021.*

*Accepted: August 14, 2021.*