

Гидротехническое строительство

УДК 502/504 : 627.83

В. А. Волосухин, доктор техн. наук, профессор, проректор по научной работе

А. И. Тищенко, канд. техн. наук, доцент

Контактная информация: тел. 8 (86352) 2-41-64, e-mail:magnet.ru

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новочеркасская государственная мелиоративная академия»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ШАХТНЫХ ВОДОСБРОСОВ ПРИ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИНАХ

В статье рассмотрено применение компьютеров для совершенствования статических расчетов с помощью проектно-вычислительного комплекса SKAD. Дана краткая методика расчета с использованием этого комплекса. Все расчеты основаны на положениях метода конечных элементов.

The article considers an application of computers for improvement of static calculations by means of the design-computer system SKAD. There is given a brief method of computerized estimation using this system. All the estimations are based on the principles of the finite elements method.

Водосбросные сооружения входят в состав водохранилищных гидроузлов и предназначены для сброса из водохранилищ в нижний бьеф паводковых или санитарных расходов воды, возникающих в результате обильных атмосферных осадков.

В процессе проектирования шахтных водосбросов при земляных плотинах выполняют следующие расчеты: гидрологические, гидравлические, на всплытие шахты водосброса, на прочность шахты водосброса и водосброс-

ной трубы. Основной объем расчетных работ – это прочностные расчеты.

Для ускорения прочностных расчетов применяется проектно-вычислительный комплекс SCAD. Комплекс реализует конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, подбор арматуры железобетонных конструкций, проверку несущей способности стальных конструкций.

Краткая характеристика методики расчета. В основу расчета положен метод конечных элементов с использованием перемещений и поворотов узлов в качестве основных неизвестных расчетной схемы [1, 2]. Развитая библиотека конечных элементов, современные быстродействующие алгоритмы решения систем уравнений и задач практически не накладывают ограничений на тип и свойства рассчитываемого объекта и дают возможность решать задачи с большим количеством неизвестных.

В проектно-вычислительный комплекс SCAD включено большое количество типов конечных элементов: стержни, четырехугольные и треугольные элементы плиты, оболочки (изотропный и ортотропный материал, многослойные конструкции), четырехугольные и треугольные элементы плиты на упругом основании и др.

Тип конечных элементов зависит от геометрической формы, правил, устанавливающих связь между перемещениями узлов конечных элементов и узлов системы, физического закона, определяющего взаимосвязь внутренних усилий и внутренних перемещений, набора параметров (жесткостей), входящих в описание этого закона, и др.

Узел в расчетной схеме метода перемещений представляет собой абсолютно жесткое тело очень малых размеров. Положение узла в пространстве при деформациях системы определяется координатами центра и углами поворота трех осей, жестко связанных с узлом. Узел – это объект, обладающий шестью степенями свободы – тремя линейными смещениями и тремя углами поворота.

Все узлы и элементы расчетной схемы нумеруются. Номера, присвоенные им, следует трактовать только как имена, которые позволяют делать необходимые ссылки.

Основная система метода перемещений выбирается путем наложения в каждом узле всех связей, запрещающих любые узловые перемещения. Условия

равенства нулю усилий в этих связях представляют собой разрешающие уравнения равновесия, а смещения указанных связей – основные неизвестные метода перемещений.

В расчетную схему должны быть включены конечные элементы следующих типов.

Стержневые конечные элементы, для которых предусмотрена работа по обычным правилам сопротивления материалов. Описание их напряженного состояния связано с местной системой координат, у которой ось $X1$ ориентирована вдоль стержня, а оси $Y1$ и $Z1$ – вдоль главных осей инерции поперечного сечения.

Некоторые стержни присоединены к узлам через абсолютно жесткие вставки, с помощью которых учитываются эксцентриситеты узловых примыканий. Тогда ось $X1$ ориентирована вдоль упругой части стержня, а оси $Y1$ и $Z1$ – вдоль главных осей инерции поперечного сечения упругой части стержня.

Правило знаков для перемещений: линейные перемещения положительны, если они направлены в сторону возрастания соответствующей координаты, а углы поворота положительны, если они соответствуют правилу правого винта (при взгляде от конца соответствующей оси к ее началу движение происходит против часовой стрелки).

Правила знаков для усилий (напряжений).

Для стержневых элементов возможно наличие следующих усилий: N – продольная сила; $M_{кр}$ – крутящий момент; M_y – изгибающий момент с вектором вдоль оси $Y1$; Q_z – перерезывающая сила в направлении оси $Z1$, соответствующая моменту M_y ; M_z – изгибающий момент относительно оси $Z1$; Q_y – перерезывающая сила в направлении оси $Y1$, соответствующая моменту M_z ; R_z – отпор упругого основания.

Положительные направления усилий в стержнях:

для перерезывающих сил Q_z и Q_y – по направлениям соответствующих осей $Z1$ и $Y1$;

для моментов M_x, M_y, M_z – против часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующей оси X_1, Y_1, Z_1 ;

положительная продольная сила N всегда растягивает стержень.

На рис. 1 показаны положительные направления внутренних усилий и моментов в сечении горизонтальных и наклонных, а также вертикальных стержней.

Вычисление расчетных сочетаний

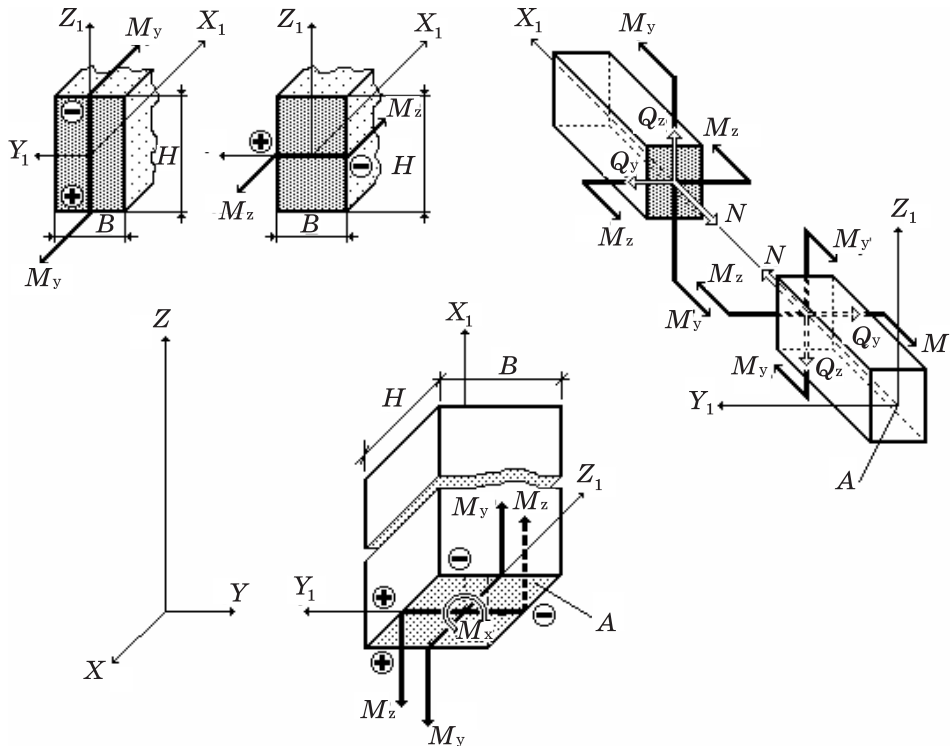


Рис. 1. Направления внутренних усилий: «+» (плюс) – растянутые; «-» (минус) – сжатые волокна поперечного сечения при воздействии положительных моментов M_y и M_z

усилий производят на основании критериев, характерных для соответствующих типов конечных элементов – стержней, плит, оболочек, массивных тел. В качестве таких критериев принимают экстремальные значения напряжений в характерных точках поперечного сечения элемента. При расчете учитывают требования нормативных документов и логические связи между загрузками.

Основой выбора невыгодных расчетных сочетаний усилий служит принцип суперпозиции. Из всех возможных сочетаний отбираются те сочетания усилий, которые соответствуют максимальному значению некоторой величины, избранной в качестве критерия и зависящей от всех компонентов напряженного состояния:

а) для стержней — экстремальные значения нормальных и касательных

напряжений в контрольных точках сечения (рис. 2);

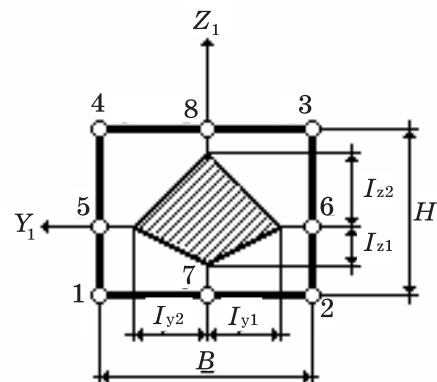


Рис. 2. Экстремальные значения нормальных и касательных напряжений в контрольных точках сечения 1...8

б) для элементов, находящихся в плоском напряженном состоянии, — по огибающим экстремальным кривым нормальных и касательных напряжений:

$$\sigma(\alpha) = N_x \cos 2\alpha + N_z \sin 2\alpha + T_{xz} \sin 2\alpha;$$

$$\tau(\alpha) = \frac{1}{2}(N_z - N_x) \sin 2\alpha + T_{xz} \cos 2\alpha. \quad (1)$$

Обозначения приведены на рис. 3. Нормальные напряжения вычисляются в диапазоне изменения углов от 90° до -90° , а касательные – от 90° до 0° . Шаг изменения углов – 15° ;

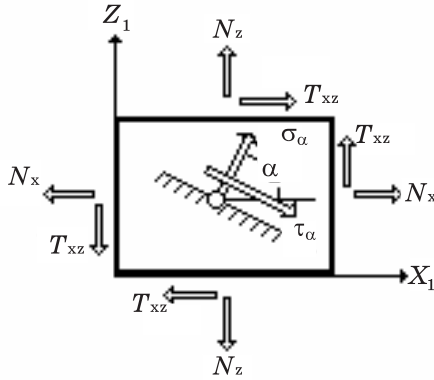


Рис. 3. Нормальные напряжения

в) для плит применяется аналогичный подход, тогда расчетные формулы приобретают следующий вид:

$$M(\alpha) = M_x \cos^2 \alpha + M_y \sin^2 \alpha + M_{xy} \sin 2\alpha;$$

$$M_k(\alpha) = \frac{1}{2}(M_y - M_x) \sin 2\alpha + M_{xy} \cos 2\alpha. \quad (2)$$

Кроме того, определяются экстремальные значения перерезывающих сил;

г) для оболочек также применяется аналогичный подход, но вычисляются напряжения на верхней и нижней поверхностях оболочки с учетом мембранных напряжений и изгибающих усилий;

д) для объемных элементов критерием определения опасных сочетаний напряжений приняты экстремальные значения среднего напряжения (гидростатического давления) и главные напряжения девиатора.

На проходящей через произвольную точку тела и произвольно ориентированной площадке, нормаль к которой v имеет направляющие косинусы l, m, n с осями x, y, z , действует нормальное напряжение s_v и касательное напряжение τ_v с равнодействующей S_v .

Существуют три взаимно перпендикулярные площадки, на которых касательные напряжения равны нулю. На этих площадках, называемых главными, действуют главные напряжения $s_1,$

s_2 и s_3 (имеется в виду, что $s_1 = s_2 = s_3$). Известно также, что главные напряжения обладают экстремальными свойствами, а именно: на любой площадке результирующее напряжение $S_v = s_1$ и $S_v = s_3$.

Для характеристики напряженно-деформированного состояния используется коэффициент Лоде–Надаи:

$$\mu_o = 2 \frac{N_2 - N_1}{N_1 - N_3} - 1, \quad (3)$$

принимая значение 1 при чистом сжатии, 0 – при чистом сдвиге, -1 – при чистом растяжении.

При выводе результатов расчета главные напряжения s_1, s_2, s_3 обозначаются как N_1, N_2, N_3 , а для углов Эйлера вводятся обозначения:

q – ТЕТА, y – PSI, j – FI.

Для плит и оболочек главные напряжения определяются на нижней (Н), срединной (С) и верхней (В) поверхностях. Положение главных площадок характеризуется углом наклона главного напряжения N_1 к оси X_1 .

Главные напряжения в стержневых конечных элементах определяются по формуле

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{4} + \tau_x^2 + \tau_y^2}, \quad (4)$$

где σ_x, τ_x и τ_y – соответственно нормальное и касательные напряжения в характерных точках контура поперечного сечения стержня.

Для сложного напряженного состояния, характеризующегося главными напряжениями s_1, s_2 и s_3 , обычно используют теорию прочности, предусматривающую возможность сопоставления некоторого эквивалентного напряжения s_e с пределом s_0^+ , который соответствует простому одноосному растяжению. Условие, характеризующее отсутствие предельного состояния в материале, записывается в виде

$$\sigma_e = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k_1, \dots, k_n) \leq \sigma_0^*, \quad (5)$$

где k_1, \dots, k_n – некоторые константы материала.

Иногда удобнее сопоставлять эквивалентное напряжение с пределом s_0^- , соответствующим сопротивлению образца материала при простом одноосном сжатии. Соответствующее эквивалентное

напряжение обозначается как s_s .

В расчете используется теория наибольших линейных деформаций:

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3); \\ \sigma_s &= |\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)|. \end{aligned} \quad (6)$$

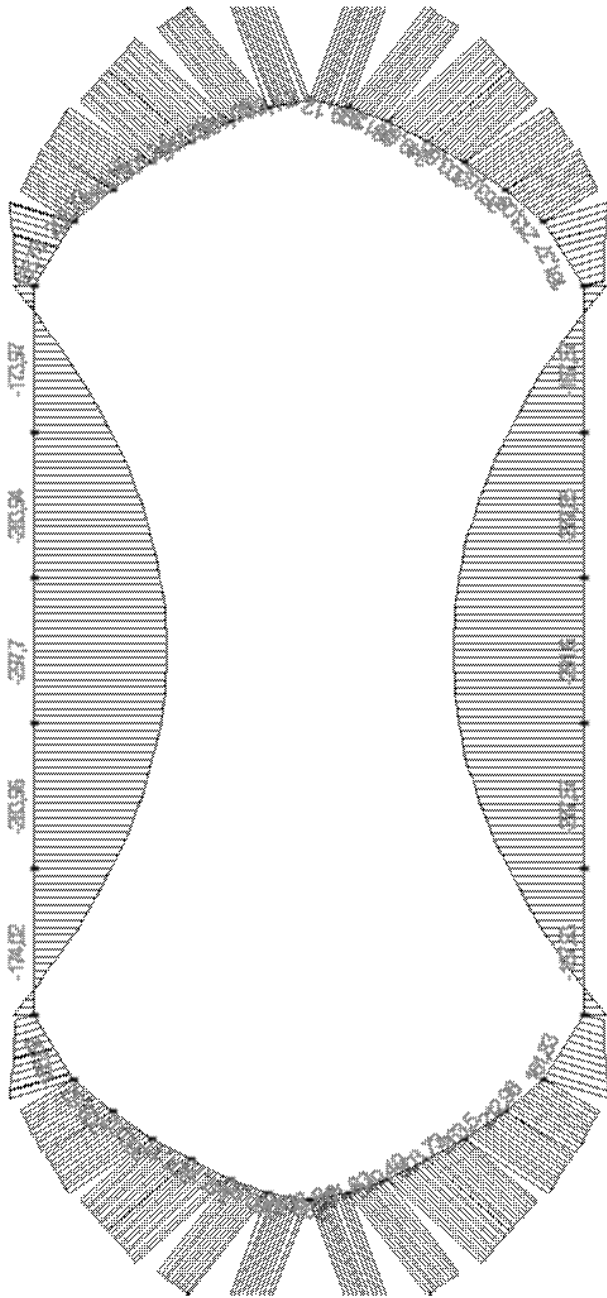


Рис. 4. Эпюра изгибающих моментов M

На рис. 4 показан вид эпюры M , полученной с применением проектно-вычислительного комплекса SCAD.

Выводы

Шахтные водосбросы при земляных плотинах являются оптимальными конструкциями в экономическом отношении. Это обуславливается тем, что данные сооружения одновременно выполняют функции водосброса и водоспуска и на их строительство расходуется меньше строительных материалов, чем на открытые водосбросные сооружения в комплексе с донными водоспусками.

Проектно-вычислительный комплекс SCAD значительно сокращает время на выполнение прочностных расчетов, реализуя конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, подбор арматуры железобетонных конструкций, проверку несущей способности стальных конструкций.

Ключевые слова: метод конечных элементов, шахта, водосброс, комплекс, стержень, расчет, моделирование, методика, тип, элемент, сочетание, загрузка, момент, сила, напряжение, площадка, эпюра.

Список литературы

1. **Волосухин, В. А.** Строительная механика [Текст] : учеб. пособие / В. А. Волосухин, Л. В. Яицкий. – Новочеркасск : НГМА, 2002. – 262 с.
2. **Саргсян, А. Е.** Строительная механика. Основы теории с примерами расчетов [Текст] : учеб. пособие / А. Е. Саргсян, А. Т. Демченко, Н. В. Дворянчиков, Г. А. Джинчвелашвили; под общ. ред. А. Е. Саргсяна. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 416 с.