

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ «ОБДЕЛКА-ГРУНТ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

М.КУЛЬБАЕВ

E.mail. ksucta@elcat.kg

Өздүк термелүүлөрдү формалары боюнча жайгаштыруу ыкмасынын негизинде MSK шкаласы боюнча 9 баллдык жыштыктагы сейсмикалык аракет этүүдөгү станциялардын конструкцияларынын чыңалган-деформациялык абалы изилденген. Сейсмикалык аракет этүү эсеби эки компоненттүү эсептөө акселерограммасын колдонуу менен жүргүзүлгөн.

В статье исследуется напряженно-деформированное состояние конструкций станции при сейсмическом воздействии интенсивностью 9 баллов по шкале MSK на основе метода разложения по формам собственных колебаний. Расчеты на сейсмическое воздействие выполнялись с использованием двухкомпонентной расчетной акселерограммы.

In the article is intense-deformed condition of designs of station is investigated at seismic influence by intensity of 9 points on scale MSK on the basis of a decomposition method under forms of own fluctuations. Calculations on seismic influence were carried out with use two-componential settlement акселерограммы.

Создание надежных методов расчета устойчивости сооружений в сложных грунтовых условиях, их прочности и надежности под действием динамических нагрузок было и остается весьма актуальной задачей. В условиях строительства Алматинского метрополитена в зоне возможных 9-10-балльных землетрясений требуются научно обоснованные рекомендации для обеспечения сейсмостойкости.

Практическое осуществление расчетов транспортных подземных сооружений на воздействие сейсмических волн представляет весьма сложную задачу динамики. Невозможно получить аналитическое решение подобных задач, поэтому привлекаются численные методы конечно-элементного анализа.

Уравнения динамического равновесия системы «обделка-грунт» конечных элементов в момент времени t записываются в виде /1-2/

$$[M] \{\ddot{U}(t)\} + [C] \{\dot{U}(t)\} + [K] \{U(t)\} = \{R(t)\}, \quad (1)$$

где $\{R(t)\}$ – вектор внешних сил, зависящий от времени.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) можно получить с помощью стандартных процедур. Однако такие процедуры неэффективны при больших порядках системы. Поэтому естественно обращаться к способам решения, имеющим механические основы. Таким эффективным методом является метод разложения перемещений по формам собственных колебаний.

Разложение по формам собственных колебаний сводится к преобразованию перемещений узлов конечных элементов с тем, чтобы привести уравнения динамического равновесия (1) к более удобной для интегрирования форме. Используется следующее преобразование перемещения:

$$\{U(t)\} = [P] \{X(t)\}, \quad (2)$$

где $[P]$ – квадратная матрица, $\{X(t)\}$ – вектор порядка n , зависящий от времени. Матрица преобразования $[P]$ неизвестна, и ее надо найти. Компоненты вектора $\{X(t)\}$ называются обобщенными перемещениями.

Подставляя (2) в (1) и умножая слева на $[P]^T$, получаем

$$[P]^T [M][P]\{\ddot{X}(t)\} + [P]^T [C][P]\{\dot{X}(t)\} + [P]^T [K][P]\{X(t)\} = [P]^T \{R(t)\}. \quad (3)$$

Так как собственные векторы и $[M]$ ортогональны, будем иметь

$$[P]^T [K][P] = [\Omega]^2; \quad [P]^T [M][P] = [I], \quad (4)$$

где $[P]$ - матрица, состоящая из столбцов-векторов $\{\varphi_i\}$, а $[\Omega^2]$ -диагональная матрица

$$[P] = [\{\varphi_1\}, \{\varphi_2\}, \dots, \{\varphi_n\}], \quad [\Omega^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \omega_2^2 & \\ & & \omega_n^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Используя соотношение (4), получаем систему уравнений равновесия для обобщенных перемещений

$$\{\ddot{X}(t)\} + [P]^T [C][P]\{\dot{X}(t)\} + [\Omega^2]\{X(t)\} = [P]^T \{R(t)\}. \quad (6)$$

Общий вид уравнений равновесия системы конечных элементов в базе собственных векторов $\{\varphi_i\}$, $i=1,2,\dots,n$ (6) показывает, что при неучете демпфирования уравнения равновесия разделяются, и временное интегрирование может быть проведено для каждого уравнения в отдельности. Метод разложения по собственным формам особенно эффективен, если можно предположить демпфирование пропорциональным, что выражается соотношением /3-4/

$$\{\varphi_i\}^T [C]\{\varphi_j\} = 2\omega_i \xi_i \delta_{ij}, \quad (7)$$

где ξ_i - коэффициенты демпфирования формы колебаний; δ_{ij} - символ Кронекера. Следовательно, используя (7), предполагая, что собственные векторы $\{\varphi_i\}$, а также $[C]$ ортогональны, система уравнений (6) разделяется на n уравнений вида

$$\{\ddot{X}(t)\} + 2\omega_i \xi_i \{\dot{X}(t)\} + \omega_i^2 \{X(t)\} = [P]^T \{r_i(t)\}. \quad (8)$$

где $\{r_i(t)\} = \{\varphi_i\}^T \{R(t)\}$.

Решение каждого уравнения (8) можно осуществить путем использования интеграла Дюамеля:

$$x_i(t) = \frac{1}{\omega_i} \int_0^t r_i(\tau) \exp(-\xi_i \omega_i (t-\tau)) \sin(\bar{\omega}_i (t-\tau)) d\tau, \quad (9)$$

где $\bar{\omega}_i = \omega_i \sqrt{1-\xi_i^2}$.

Пусть система совершает колебательный процесс под действием инерционных сил

$$\{R(t)\} = -[M]\{\ddot{U}_0(t)\}, \quad (10)$$

где $\{\ddot{U}_0(t)\} = \{A\}\{\ddot{a}_0(t)\}$; $\{\ddot{a}_0(t)\}$ - акселерограмма землетрясения, $\{A\}$ - вектор направляющих косинусов углов между направлением падения сейсмической волны с координатными осями.

Задача состоит в определении напряженно-деформированного состояния конструкций станции при сейсмическом воздействии интенсивностью 9 баллов по шкале MSK. Расчеты на сейсмическое воздействие выполнялись с использованием двухкомпонентной расчетной акселерограммы, действующей на глубине $h = 59,0$ м и включающей горизонтальную поперечную и вертикальную компоненты. Продолжительность акселерограммы - 20 с, число точек - 2000, шаг оцифровки - 0,01 с. Компоненты акселерограммы показаны на рис. 1-2. Масштабирование компонент выполнено так, чтобы пиковые значения ускорений составляли $1,0 \text{ м/с}^2 (\approx 0,1 \text{ g})$.

Было учтено 160 собственных форм. Затухание по каждой из форм принималось равным 10 % от критического.

Расчеты системы «обделка-грунт» на сейсмическое воздействие выполнены методом разложения по формам собственных колебаний.

Расчёты выполнялись на одновременное действие горизонтальной поперечной и вертикальной компонент исходной расчетной акселерограммы, заданной на глубине $h = 59,0$ м и вызывающей на дневной поверхности грунта колебания, соответствующие интенсивности землетрясения 9 баллов.

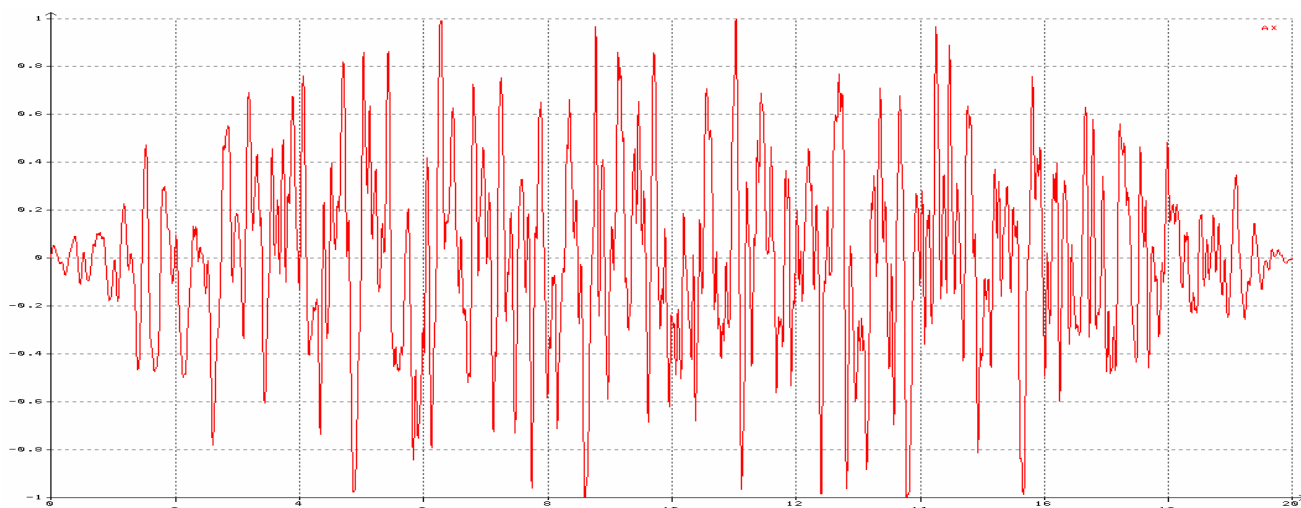


Рис. 1. Горизонтальная поперечная компонента акселерограммы землетрясения (м/с^2)

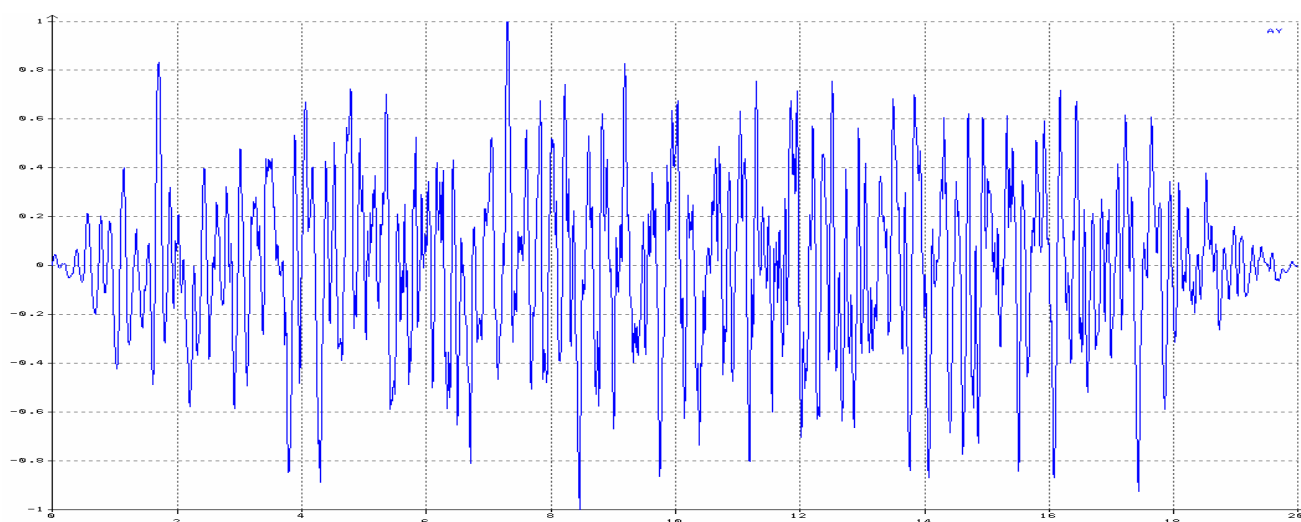


Рис. 2. Вертикальная компонента акселерограммы землетрясения (м/с^2)

Для анализа НДС конструкции станции в целом при сейсмическом воздействии выбран момент времени $t^*=8,72$ с, которому соответствуют экстремальные значения растягивающих напряжений. На рис. 3 показано распределение горизонтальных перемещений в системе «обделка-грунт». Наибольшие горизонтальные перемещения грунта на глубине 20 м составляют $u_x=9,6$ мм. На рис. 4 дано распределение горизонтальных перемещений для конструкции. Максимальные горизонтальные перемещения достигают величины $u_x = 5,9$ мм в верхнем своде центрального тоннеля. На рис. 5 показано распределение вертикальных перемещений для конструкции. Вертикальные смещения конструкции u_y находятся в пределах 1,0 мм. На рис. 6 даны напряжения на внутренней поверхности обделки. Максимальные растягивающие

напряжения достигают величины $\sigma_{\max}^{\text{растяж.}} = 3,7 \text{ МПа}$ и наблюдаются в зонах примыкания нижних и верхних сводов тоннелей к пилонам. Наибольшие сжимающие напряжения возникают в симметрично расположенных зонах и достигают величины $\sigma_{\max}^{\text{сжимаю.}} = 4,1 \text{ МПа}$.

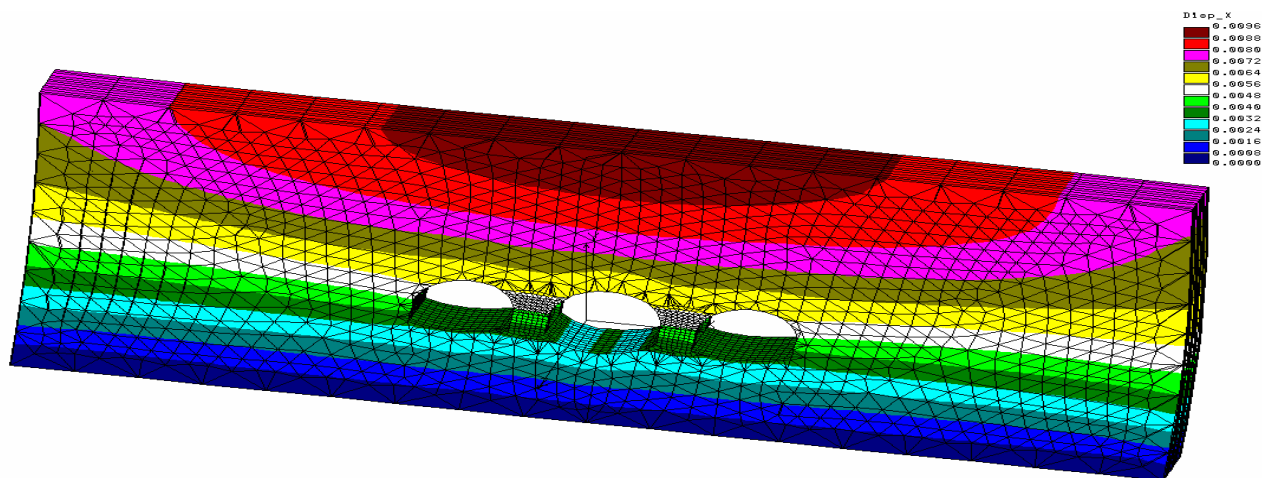


Рис.3. Распределение горизонтальных перемещений (м) в системе «обделка-грунт» при сейсмическом воздействии в момент времени $t^* = 8,72 \text{ с}$

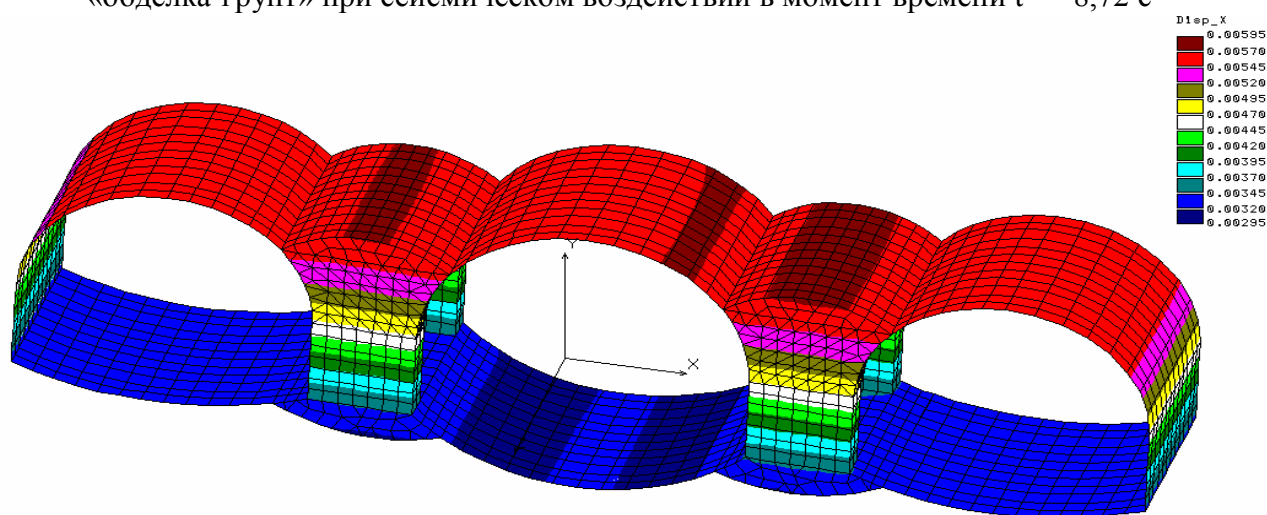


Рис. 4. Распределение горизонтальных перемещений (м) в обделке при сейсмическом воздействии в момент времени $t^* = 8,72 \text{ с}$

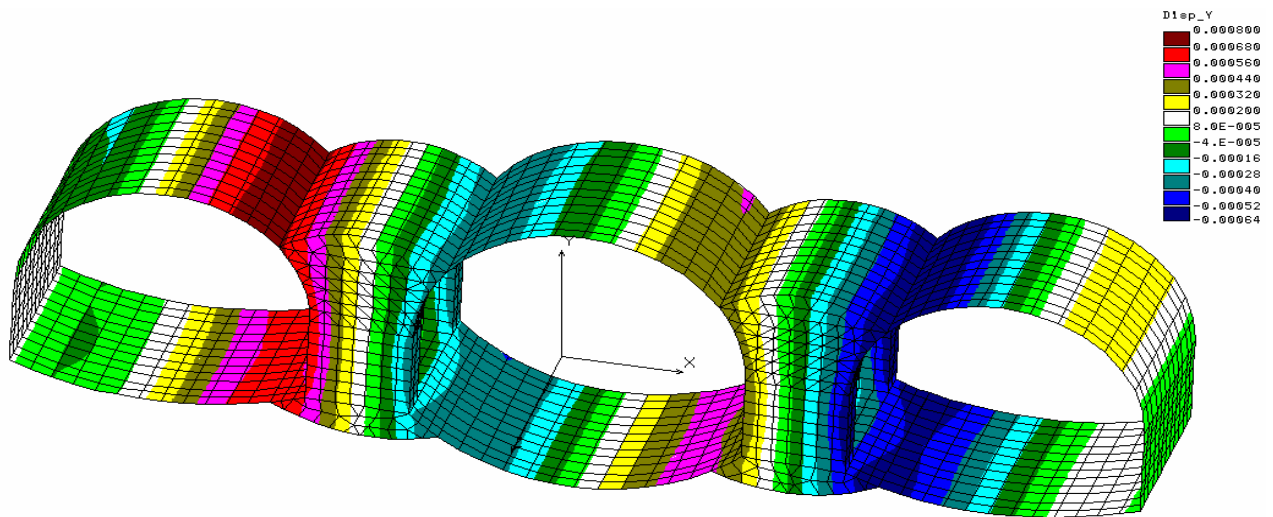


Рис. 5. Распределение вертикальных перемещений (м) в обделке при сейсмическом воздействии в момент времени $t^* = 8,72$ с

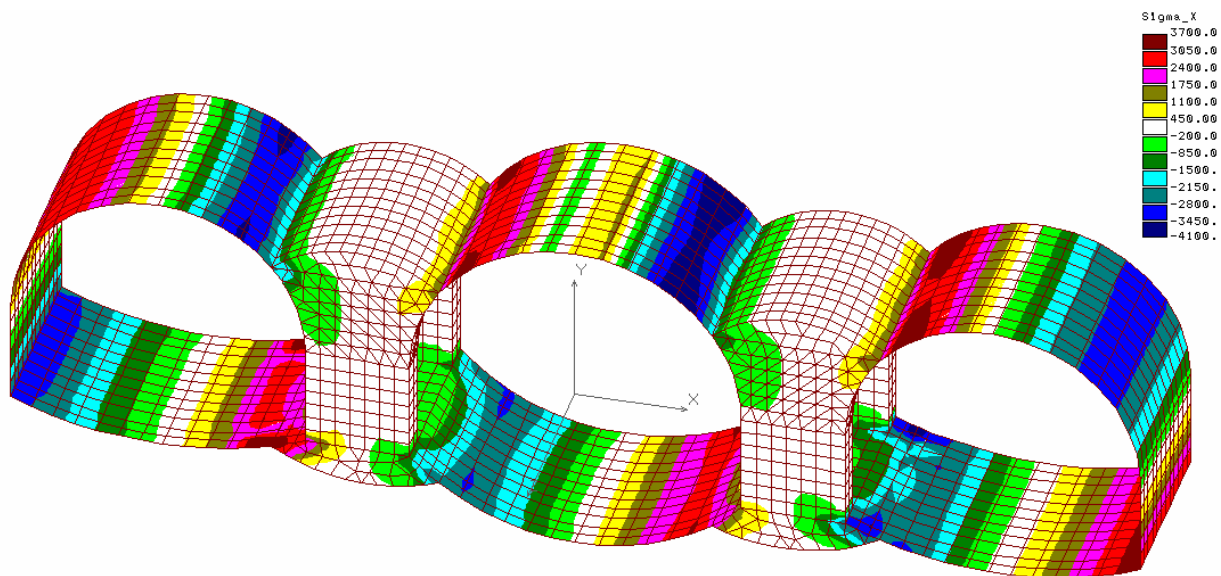


Рис. 6. Распределение нормальных тангенциальных напряжений (кПа) на внутренней поверхности обделки при сейсмическом воздействии в момент времени $t^* = 8,72$ с

На рис. 7 показаны напряжения на внешней поверхности обделки (на контакте со слоем набрызгбетона). Максимальные растягивающие напряжения достигают величины $\sigma_{\max}^{\text{растяг.}} = 3,37\text{МПа}$, а наибольшие сжимающие напряжения— $\sigma_{\max}^{\text{сжимаю.}} = 4,1\text{МПа}$. Указанные напряжения действуют на ограниченных участках. На большей части поверхности обделки значения растягивающих и сжимающих напряжений не превосходят 1,0 МПа.

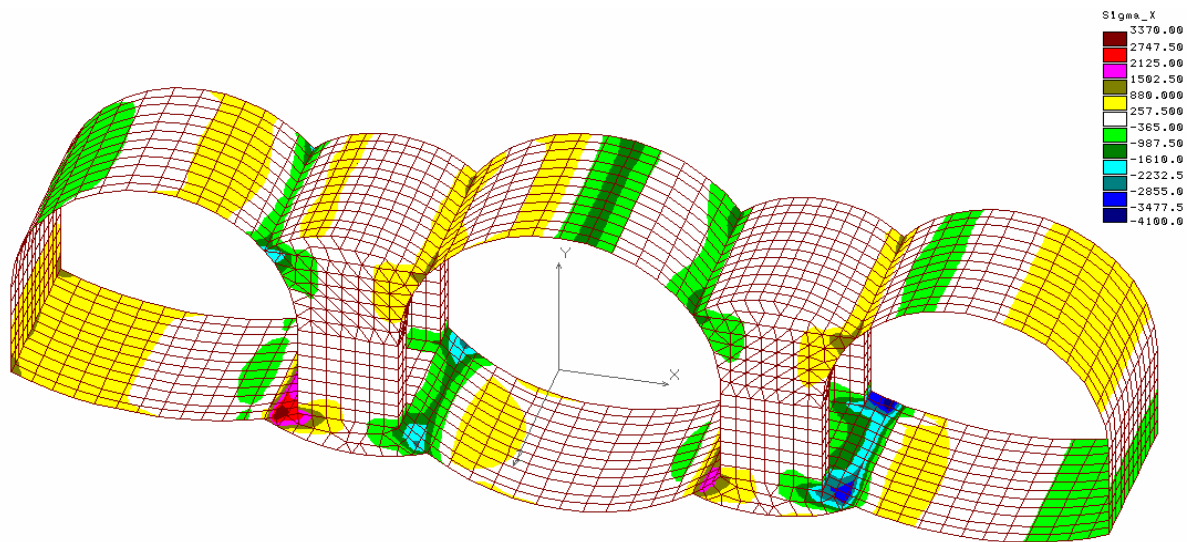


Рис. 7. Распределение нормальных тангенциальных напряжений (кПа) на внешней поверхности обделки при сейсмическом воздействии в момент времени $t^* = 8,72$ с

На рис. 8 дано распределение нормальных вертикальных сейсмических напряжений в пилонах. Величины растягивающих напряжений не превышают $\sigma_{\max}^{\text{растяг.}} = 4,5$ МПа, а сжимающих – $\sigma_{\max}^{\text{сжимаю.}} = 5,1$ МПа. Указанные величины напряжений наблюдаются в ограниченных участках нижних зон пилонов.

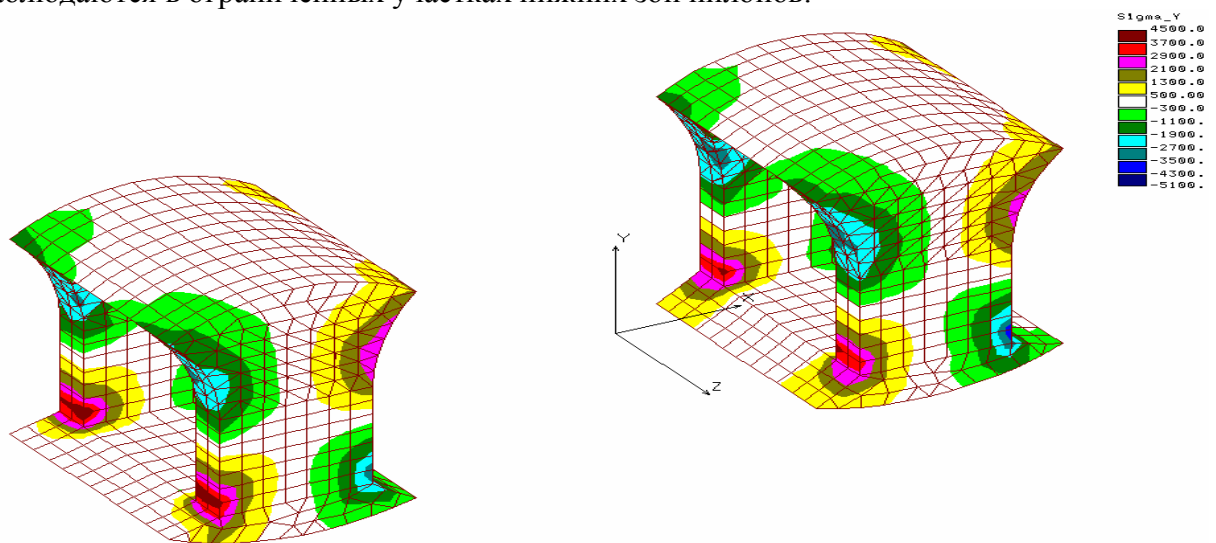


Рис. 8. Распределение нормальных вертикальных напряжений (кПа) в пилонах при сейсмическом воздействии в момент времени $t^* = 8,72$ с

Список литературы

1. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
2. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
4. Сегерленд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.