

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕКАЧЕСТВЕННО ВЫПОЛНЕННОГО ПЕРВИЧНОГО НАГНЕТАНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБДЕЛКИ

Петренко В.Д.

Тютюкин А.Л.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта

Петренко В.И.

Киевметрострой

Важную роль в формировании НДС системы «крепление–массив» играет развитие напряжений и перемещений в массиве, так как он является самонагруженной частью системы и перераспределяет напряжения в обделке. Поэтому для нормальной эксплуатации следует с самого начала ввести конструкцию в совместную работу с окружающим массивом путем заполнения полостей, образовавшихся в процессе проходки. Но при проходке щитом с хвостовой оболочкой в первом и втором смонтированных кольцах обделки между ними и массивом может образовываться щель за счет выработанного пространства для монтажа колец. Так как щит имеет толщину 4...6 см в хвостовой оболочке и для монтажа обделки оставлен строительный зазор, то при освобождении смонтированного кольца из-под хвостовой оболочки после передвижения щита и размещения его в проектном положении между ним и окружающим массивом остается промежуток не меньше 10...25 см. Оставленная щель должна быть заполнена песчано-цементным раствором при первичном нагнетании. Представленные ниже материалы доказывают, что неверно выполненный процесс первичного нагнетания приводит к значительному изменению НДС системы «обделка–массив».

При выполнении первичного нагнетания за обделку на внешнюю поверхность обделки начинает действовать избыточное давление песчано-цементного раствора, который заполняет пространство между массивом и обделкой. Значение давления в некоторых случаях является значительным (отмечены случаи, когда давление песчано-цементного раствора было равно 70...75 % от горного давления [1]), что может свидетельствовать о невыполнении технологии проведения работ.

Для анализа влияния первичного нагнетания применена модель железобетонной обделки с взаимодействием с окружающим массивом (рис. 1).

Общее число узлов КЭ-модели – 40 989, общее число КЭ – 36 456. Модель была создана таким образом, чтобы воспроизвести все реальные геометрические размеры перегонного тоннеля, взятые из проектной документации: диаметр внутренний – 5,1 м, диаметр внешний – 6,0 м (железобетонные блоки В30).

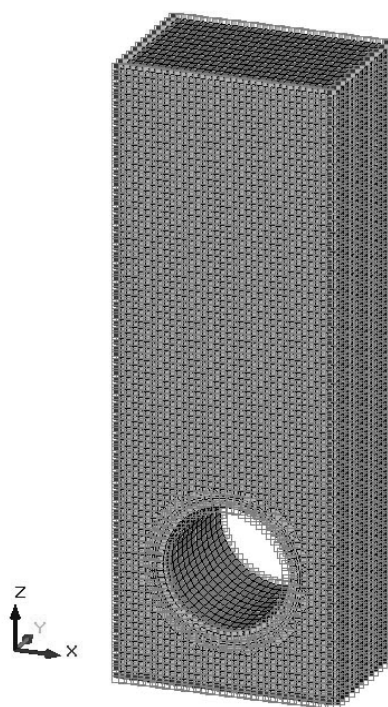


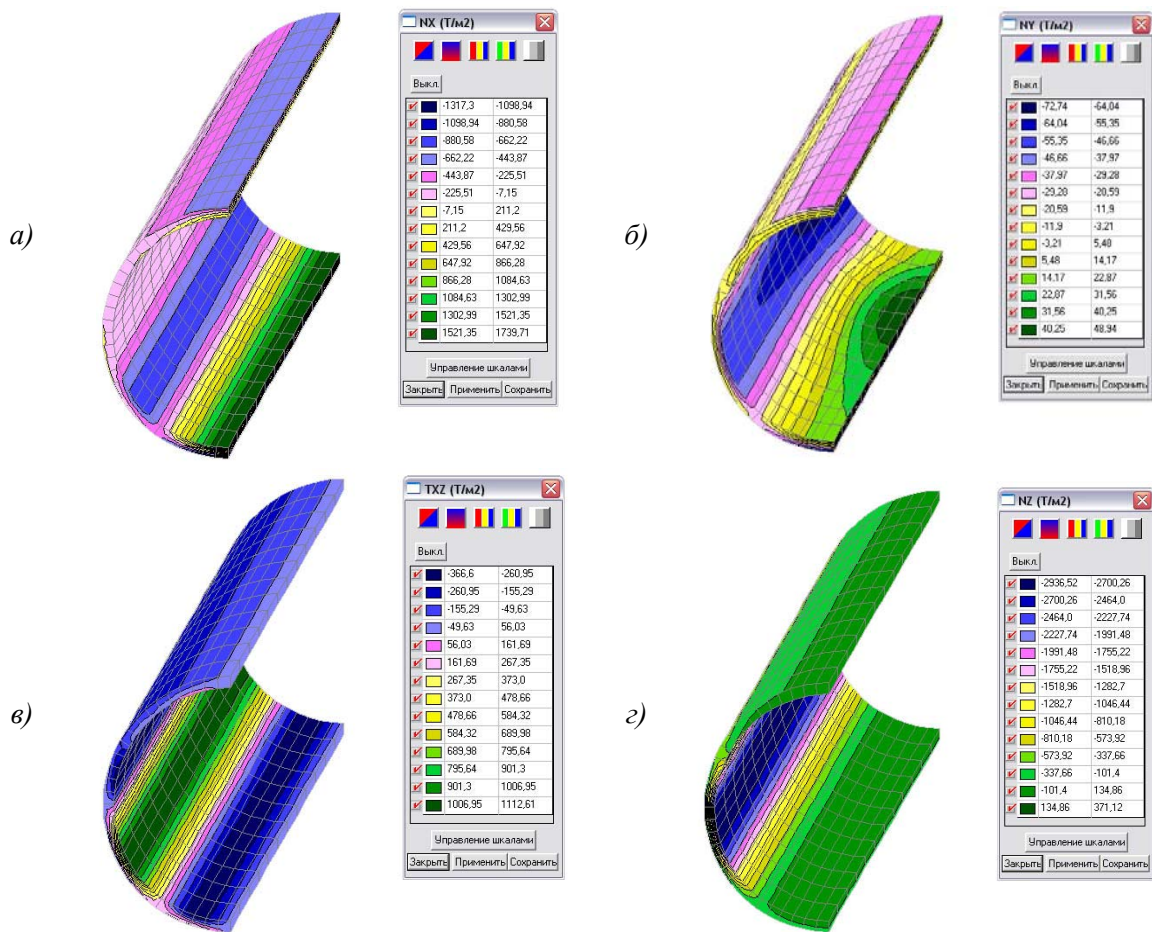
Рис. 1. Конечно-элементная модель (КЭ-модель) перегонного тоннеля со взаимодействием с окружающим массивом

На схему наложены граничные условия: верх модели – без закреплений; стороны, параллельные оси тоннеля (плоскость YZ), – запрещение перемещений по осям X и Y ; стороны, перпендикулярные оси тоннеля (плоскость XZ), – запрещение перемещений по оси Y (это наиболее точно отвечает условию плоской деформации); низ модели – запрещение перемещений по осям X , Y и Z . Эти граничные условия наиболее точно позволяют воспроизвести реальную картину деформации модели [2].

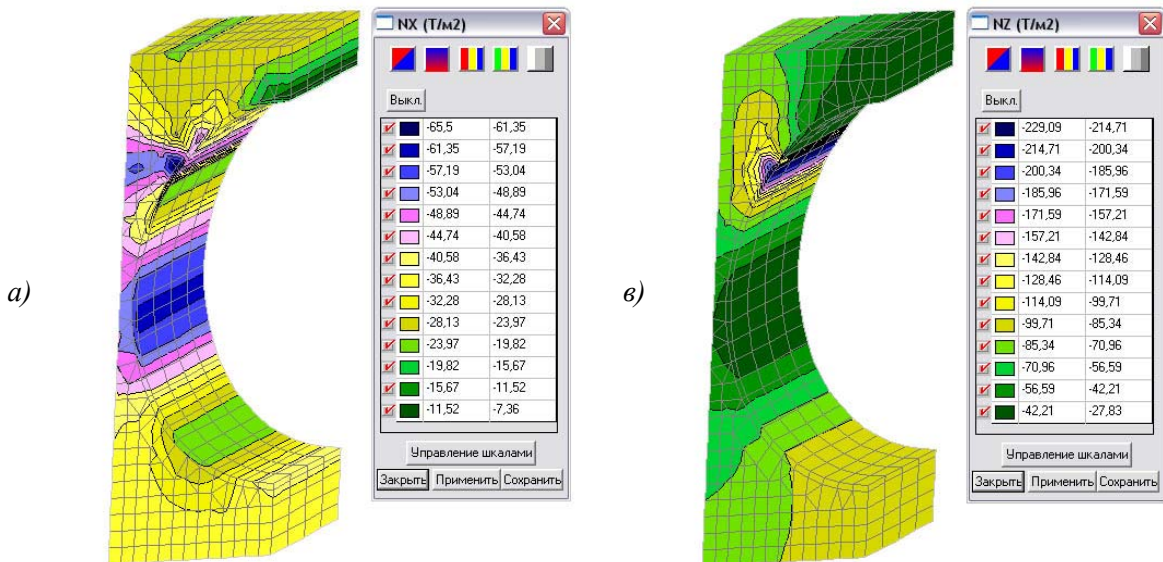
Модели были заданы деформационные свойства материалов, которые получены из реальных лабораторных исследований. В роли окружающего массива была принята глина спондиловая сухая маловлажная с коэффициентом по М.М. Протогьяконову $f = 1$, модуль упругости $E = 35$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, плотность $\gamma = 1,9$ т/м³. Деформационные свойства железобетона получены как приведенные характеристики на основе предложенных в работе [3] формул и составляли: железобетон В30, модуль упругости $E = 38\,500$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,02$, плотность $\gamma = 2,5$ т/м³. Деформационные характеристики цементно-грунтового материала следующие: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$, плотность $\gamma = 2,1$ т/м³.

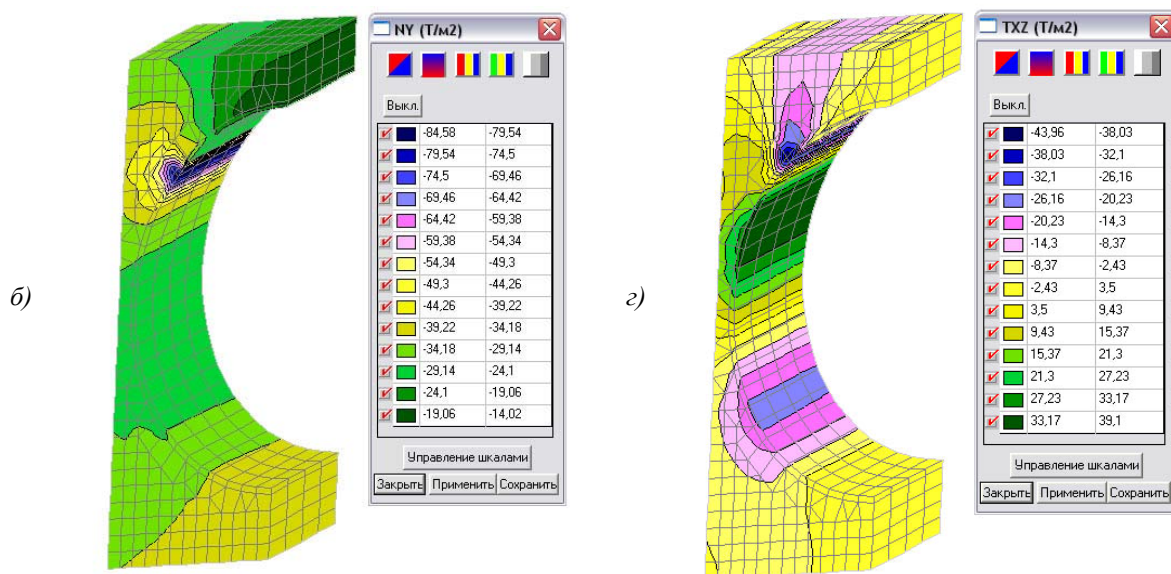
В разработанной КЭ-модели перегонного тоннеля предусмотрена щель шириной 10 см, которая находится в верхней части свода и характеризуется углом раствора $30 \dots 35^\circ$, отложенного от вертикали. Таким образом, щель занимает 1/6 поверхности обделки. Для того, чтобы решение этой задачи МКЭ мультифронтальным методом было корректным, то есть, чтобы матрица жесткости не стала сингулярной по причине наличия полости среди элементов с явными деформационными характеристиками, считаем, что щель заполнена воздухом с модулем упругости $E = 0,06$ МПа, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,49$ и плотностью $\gamma = 0,0001$ т/м³.

На основе результатов численных расчетов (рис. 2 и 3) проведен сравнительный анализ случая модели со щелью и модели с проведенным нагнетанием (толщина слоя 20 см). Из результатов анализа можно сделать вывод о том, что наличие щели между обделкой и окружающим массивом, причиной появления которой являются технологические процессы проходки перегонного тоннеля щитовым способом и монтажа обделки, а также неправильное выполнение первичного нагнетания (его задержка или некачественное проведение) значительно повышает вертикальные перемещения (в 1,2 раза). Если в случае первичного нагнетания перемещения замковой части по оси Z составляли $87,2 \dots 94,8$ мм, то в случае щели они составляют $101,1 \dots 115,5$ мм (рис. 2, а, б). Причем вертикальные перемещения верха модели (мульда оседания) выросли с 117 до 202 мм (в 1,6 раза). Анализ напряжений позволяет сделать вывод о том, что они, незначительно изменившись качественно, в сравнении со случаем выполненного нагнетания, изменилась количественно в сторону уменьшения. Например, количественно они уменьшаются в 1,05...1,19 раза (напряжение по оси X), в 1,13...1,36 раза (напряжение по оси Y) и в 1,01...1,1 раза (напряжение по оси Z). Это объясняется тем, что при возможности развития окружающим массивом некоторых не критических деформаций, при которых не нарушается его цельность, напряжения в обделке уменьшаются [4]. В научных источниках описаны технологии, в которых возможность развития контролируемых пластических деформаций в массиве позволяет снизить уровень напряжений в обделке, однако методика контроля над деформациями не разработана по причине сложных процессов, которые развиваются в массиве [4].



а) нормальные напряжения по оси X; б) нормальные напряжения по оси Y;
 в) нормальные напряжения по оси Z; г) касательные напряжения в плоскости XZ.
 Рис. 2. Изолинии и изополя параметров НДС перегонного тоннеля в случае щели над обделкой





а) нормальные напряжения по оси X; б) нормальные напряжения по оси Y; в) нормальные напряжения по оси Z; г) касательные напряжения в плоскости XZ.

Рис. 3. Изолинии и изополя параметров НДС перегонного тоннеля в случае щели над обделкой (массив вокруг обделки)

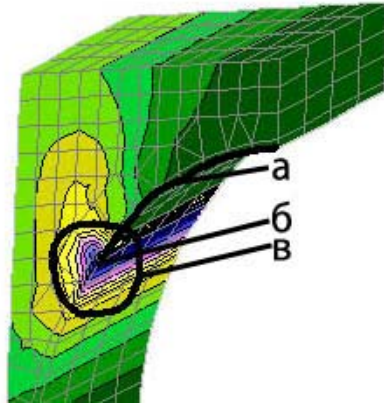
Проведем проверку прочности обделки по эквивалентным напряжениям (табл. 1).

Таблица 1 – Расчет эквивалентных напряжений по четвертой теории прочности

№ п/п	Напряжение, МПа			Эквивалентное напряжение, МПа
	Нормальное по оси X	Нормальное по оси Z	Касательное в плоскости XZ	
1.	6,47	1,34	-4,49	10,62
2.	17,39	1,34	-4,49	19,65
3.	-2,25	-2,93	-0,49	4,58

Примечание. В таблице под порядковыми номерами представлены такие случаи:
1 – замок; 2 – лоток; 3 – точка на горизонтальном диаметре.

Как свидетельствует анализ эквивалентных напряжений, их значения увеличились в отличие от напряжений в случае нагнетания: в замке – 1,25, в лотке – 1,39 и на горизонтальном диаметре – 1,23 раза. Это доказывает тот факт, что хоть компоненты напряжений и несколько изменились в сторону уменьшения, их совокупное распределение, которое характеризуют эквивалентные напряжения, изменилось в сторону увеличения, то есть в случае щели прочность обделки уменьшилась. Для более полного анализа рассмотренных напряжений в массиве результаты расчета приведены таким образом, что во фрагменте массива без обделки виден концентратор напряжений на грани щели (рис. 4).



a – граница щели; – точка, в которой вычисляется эквивалентное напряжение;
b – область концентрации напряжений.

Рис. 4. Фрагмент изолиний и изополей напряжений на грани щели (обделка не показана)

Проведем анализ эквивалентных напряжений в месте концентратора, но, так как окружающий массив является грунтом, то применим не четвертую теорию прочности, а третью – теорию наибольших касательных напряжений – вариант теории Кулона–Мора [5]:

$$\left. \begin{aligned} -[\sigma] &\leq \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2} \leq [\sigma] \\ -[\sigma] &\leq \frac{(\sigma_x + \sigma_z)}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2} \leq [\sigma] \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где σ_x но σ_z – компоненты нормальных напряжений по глобальным осям X и Z;

τ_{xz} – касательный компонент в плоскости XZ;

$-[\sigma]$ и $[\sigma]$ – пределы прочности материала на растяжение и сжатие соответственно.

За предел прочности грунта на сжатие примем соответственно средние значения для спондиловой сухой глины, полученные из стабилметрических исследований (боковое давление $\sigma_{бок} = 0,2$ МПа) – $[\sigma] = 1,5 \dots 2,2$ МПа; предел прочности грунта на растяжение – $-[\sigma] = C/5 = 0,1/5 = 0,02$ МПа [6].

Вычислим эквивалентное напряжение в точке *a* (рис. 4) по формуле (1) по следующим значениям (по модулю) $\sigma_x = 0,655$ МПа; $\sigma_z = 2,29$ МПа; $\tau_{xz} = 0,439$ МПа. Оно равняется для первой части формулы (1) – 1,85 МПа; для второй части формулы (1) – 0,545 и 2,40 МПа соответственно.

Как следует из значений эквивалентного напряжения, оно приближается к значению предела прочности в точке концентрации (1,85 МПа) и превышает его (2,40 МПа), то есть можно утверждать, что прочность грунта в этой области исчерпана. После разрушения грунта в этой точке в массиве могут одновременно развиваться значительные деформации (явление вывала) и, хотя ширина щели небольшая (до 10 см), возможно, что часть массива, вывалившись, станет причиной дальнейшего развития деформаций.

Известно, что динамическое действие может быть учтено в статических или квазистатических расчетах с помощью коэффициента динамичности, который при ударе считается равным 2, то есть статический вес вывала удваивается, что может быть причиной разрушения обделки. Поэтому своевременно выполненное первичное нагнетание по верно разработанной технологии является залогом нормальной совместной работы обделки с грунтовым массивом.

Литература

1. Виноградов Б.Н. Определение нормативных нагрузок и коэффициентов перегрузки по результатам измерений горного давления // Транспортное строительство. – 1963. – № 9. – С. 59-61.
2. Петренко В.Д., Селихова Т.А., Тютюкин А.Л. Численный анализ влияния граничных условий модели системы «сооружение–основание» МКЭ / Науковий вісник Національного гірничого університету, Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – №11. – С. 51-56.
3. Устинов В.П., Круглов В.М., Кудашов В.И. Метод конечных элементов в расчете железобетонных конструкций / В сб. «Метод конечных элементов в строительной механике», Горький, 1975, Горьковский университет им. Н.И. Лобачевского – С. 141-148.
4. Заворицкий В.И. Проектирование подземных транспортных сооружений. – К.: Будівельник, 1975. – 204 с.
5. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
6. Юркевич П. Геомеханические модели в современном строительстве // Подземное пространство мира. – № 1-2. – 1996. – С. 10-31.