

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ КОЛОННОЙ
СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА В ПРОЦЕССЕ ЕЕ СООРУЖЕНИЯ**

В статье представлены результаты теоретических и практических исследования напряженно-деформированного состояния конструкции колонной станции метрополитена в процессе ее сооружения.

**CONFORMITIES TO THE LAW OF TENSELY-DEFORMED STATE
FORMING OF COLUMNAR STATION CONSTRUCTION OF
UNDERGROUND METROPOLISES IN THE PROCESS OF ITS BUILDING**

In the article the results of theoretical and practical are represented researches of the tensed and deformed state of construction of the columnar station of underground metropolises in the process of its building.

Одной из задач исследования напряженно-деформированного состояния системы «крепь–массив», разрабатываемых в последнее десятилетие, является задача технологического сопровождения [1], то есть задача влияния технологических процессов сооружения конструкции на ее общее напряженно-деформированное состояние (НДС). Например, при сооружении колонной станции большое влияние на формирование ее напряженно-деформированного состояния имеют технология проведения работ и срок введения несущих конструкций в работу.

Учет некоторых факторов, таких как временное крепление, выполнение работ по бетонированию отдельными захватками, поэтапное раскрытие сечения подземного сооружения, на напряженно-деформированное состояние подземного сооружения детально разработан в работе [2], причем созданная модель отличается высокой степенью дискретизации, а ее параметры были взяты из лабораторных исследований. В модели сооружающегося горным способом тоннеля также учтена нерегулярность раскрытия сечения, так как в половине модели калотта раскрыта, а в другой части раскрыто всё сечение.

Несколько в другом ключе задача влияния технологии решается в работах [3, 4], в которых исследуется влияние технологии строительства надземного сооружения на уже существующее подземное. Данный аспект проблемы влияния технологии на общее напряженно-деформированное состояние системы «крепление–массив» также важен, но находится несколько в стороне от основных вопросов.

Постановка задачи о прогнозировании деформаций грунтового массива при проходке тоннелей также ставится в работе [5]. Однако, решение этой задачи проводится на основе плоской конечно-элементной модели (расчетный комплекс, разработанный в НИЦ ТМ ОАО ЦНИИС «РУПС-02»), которая создана на основе треугольных конечных элементов пластинчатого типа, которые в дальнейшем совместно работают со стержневыми КЭ, которые моделируют по-

стоянное крепление. Проблемы взаимодействия стержневых и пластинчатых КЭ рассматривались в работах [1, 3] и корректное применение данных типов в одной модели требует ввода дополнительных условий или специальных элементов, которые позволяют учесть разность работы стержня и пластины. В рассматриваемой работе не указано, применялись ли такие специальные элементы, что не даёт возможности судить о верности и точности проведенных конечно-элементных расчетов, тем более, что никаких презентационных данных в виде изополей или изолиний в данной работе не было приведено.

Задача прогноза деформаций грунтового массива в процессе строительства подземного сооружения более детально рассматривается также и в работе [6]. Основными изменениями по отношению к применявшимся ранее в практике расчетам в эксплуатационной стадии являются применение трехмерной модели, которая позволяет не вводить дополнительных компромиссных допущений, упругопластическая постановка задачи и учет процесса передвижения проходческого комплекса. Однако, в используемых моделях (расчетный комплекс «PLAXIS 3D Tunnel 2») применена тетраэдрическая конечно-элементная сетка, явно построенная в автоматическом режиме, что снижает точность проведения конечно-элементного расчета. Выводы, сделанные авторами работы [6] об удовлетворительном применении упругопластической модели Кулона–Мора в песчаных грунтах и завышении деформаций в аналогичном применении модели для глинистых грунтов в 2 раза несколько не обоснованно, так как проведения дополнительных исследований этого вопроса проведено не было.

Решение подобной задачи, но в более широкой постановке, приведено в работе [7]. Условия задачи расширены, что позволило учесть шесть конструктивно-технологических фактора: 1) диаметр щита; 2) глубину заложения тоннеля; 3) давление активного пригруза в забое щита; 4) давление тампонажного раствора за обделкой; 5) степень заполнения заобделочных пустот тампонажным раствором; 6) наличие находящихся на трассе тоннеля наземных зданий. Несомненно, рассматривать первые два учтенных фактора тривиально, так как получение адекватных реальному поведению системы «крепь–массив» в процессе эксплуатации или строительства возможно лишь при точном соответствии геометрическим параметрам всех ее элементов. Учет шестого фактора также не оригинален, так как масса наземных зданий задаётся в конечно-элементной модели в виде распределенной нагрузки, что не представляет каких-либо методических и практических трудностей. Методика учёта третьего фактора в работе [7] не приведена, однако можно предполагать, что давление на лоб забоя также прикладывалось в виде активного давления в виде сосредоточенной нагрузки. Хотя в работе заявлен учет влияния тампонажного раствора (четвёртый и пятый факторы), его методика не описана, а визуальный анализ конечно-элементной модели, размеры конечных элементов которой слишком большие, чтобы получить хотя бы качественную картину распределения параметров деформированного состояния, позволяет сделать вывод, что давление тампонажного раствора также задавалось в виде распределенной нагрузки, а оценить степень влияния его заполнения на представленной в работе КЭ-модели весьма проблематично.

КЭ-модель, видимо также построенная в автоматическом режиме (расчетный комплекс «PLAXIS 3D Tunnel 2») явно не позволяет получить сколько-нибудь точные результаты по причине неверной дискретизации на конечные элементы, которые имеют размеры примерно $2 \times 2 \times 2$ м, причем никакого сгущения в месте примыкания обделки к массиву не наблюдается. Таким образом, проведенные 23 серии численных расчетов носят явно качественный характер.

Более детально и методологически разработано решение задачи определения оптимальной величины пригруза забоя приводится в работе [8]. К несомненным преимуществам постановки задачи относится учёт взаимодействия бетонной обделки с окружающим грунтом, поведение которого описывается математической моделью Ю.К. Зарецкого, а также моделирование процесса проходки подземного сооружения в пространственной постановке (комплекс «GEO-MIGG», разработанный в МИГГ). Также детально разработан вопрос создания уровней модели, которые отвечают за реальное геологическое строение участка (геологическая модель), геометрические размеры, деформационные характеристики и особенности проходки (математическая модель), наличие и изменение гидрогеологического режима (геофильтрационная модель) и влияния наземных сооружений (модель городской застройки). Процесс поэтапного сооружения тоннеля с дальнейшим исследованием пригруза лба забоя и отыскания его оптимального значения также разработан детально, однако следует отметить, что применение тетраэдрической сетки конечных элементов 1-го порядка (четырёхузловых) явно негативно влияет на точность результатов, что было отмечено во многих классических работах [9, 10]. Повышение точности в случае использованной сетки из тетраэдров можно было бы получить, используя изопараметрические конечные элементы 2-го порядка (восьмиузловые тетраэдры с дополнительными промежуточными узлами на каждой стороне) или, что является более целесообразным, использовать в модели октаэдры, параллелепипеды или, в крайнем случае, треугольные призмы.

Важным достоинством работы [7] по отношению к работе [8] является то, что пригрузка от городской застройки моделируется не просто распределенной нагрузкой, а объектами, имитирующими реальные здания и сооружения. Это, в отличие от распределенной нагрузки, позволяет оценить неравномерность осадок фундаментов зданий и сооружений и влияние их жесткости на общее напряженно-деформированное состояние системы.

Однако, в рассмотренных выше работах, исследование направлено на перегонные тоннели, то есть объекты с заведомо простым ходом исследования, что связано с простой их геометрией и технологией сооружения. Колонные станции глубокого заложения, в свою очередь, возводятся закрытым способом путем постепенной проходки и закрепления выработанного пространства и представляют собой сложные пространственные объекты с изменением жесткостей элементов и сложным характером взаимодействия. Обделка при этом вступает во взаимодействие с уже деформированным окружающим породным массивом. Степень интенсивности влияния горного давления может быть разной и зависит, главным образом, от глубины залегания выработки, ее размеров, техноло-

гии сооружения подземных сооружений и деформационных характеристик пород и крепления.

Обделка станции, на которую в монтажный период действует нагрузку от собственного веса и вес монтажных устройств, из-за отсутствия заполнения зазоров между ней и породой не встречает значительного воздействия со стороны массива. Поэтому, чем быстрее возведена конструкция обделки и осуществлено нагнетание, тем меньшую зону охватит процесс активной деформации, как окружающих пород, так и самой обделки. Указанное обстоятельство особенно важно для станций метрополитенов, в большинстве своем сооружаемых не на полное сечение. Стадиями ответственности сооружения станции являются работы по объединению отдельных тоннелей в полное сечение станционной конструкции со сложным поперечным профилем. В зависимости от последовательности раскрытия выработки на полный профиль горное давление может оказываться в разных сочетаниях и, следовательно, может по-разному взаимодействовать с отдельными элементами несущей конструкции.

Полученные данные о НДС колонн являются материалом для оценки закономерности распределения взаимодействий окружающего массива, как по длине, так и по ширине каждой исследуемой станции. Благодаря измерениям напряжений в колоннах представляется возможным оценить не только величину действующих нагрузок, но и работу всей конструкции исследуемой станции.

Монтаж элементов внутреннего несущего каркаса и включение их в общую конструкцию станции осуществляется разными технологическими способами в зависимости от последовательности основных работ по сооружению станции. Существует органическая связь между принципиальным конструктивным решением станции колонного типа глубокого залегания и той последовательностью ведения работ, которая необходима для объединения отдельных выработок в общий профиль станционной конструкции.

Один из распространенных способов сооружения станции является способ, в котором элементы внутреннего несущего каркаса полностью монтируются в отдельных замкнутых боковых тоннелях, пройденных заранее. Наличие подготовленных опор в виде двух рядов колонн позволяет осуществить все последующие работы по раскрытию станции на полный профиль (разработку среднего пролета) постепенно продвигающимся фронтом. При этом оба ряда колонн загружаются постепенно, в соответствии со стадиями проходки части свода среднего пролета, а затем при проходке ядра, разборке обделки боковых тоннелей и разработке обратного свода.

Выделим четыре основных этапа сооружения станции (рис. 1):

Стадия 1. Проходка боковых тоннелей и монтаж несущих конструкций.

Стадия 2. Сооружение свода среднего тоннеля.

Стадия 3. Разработка ядра и разборка обделки боковых тоннелей.

Стадия 4. Сооружение обратного свода.

В соответствии с приведенными на рис. 1, а) этапами сооружения построены прототипы моделей станции (рис. 1, б), расчетная область которых разбита на плоские конечные элементы.

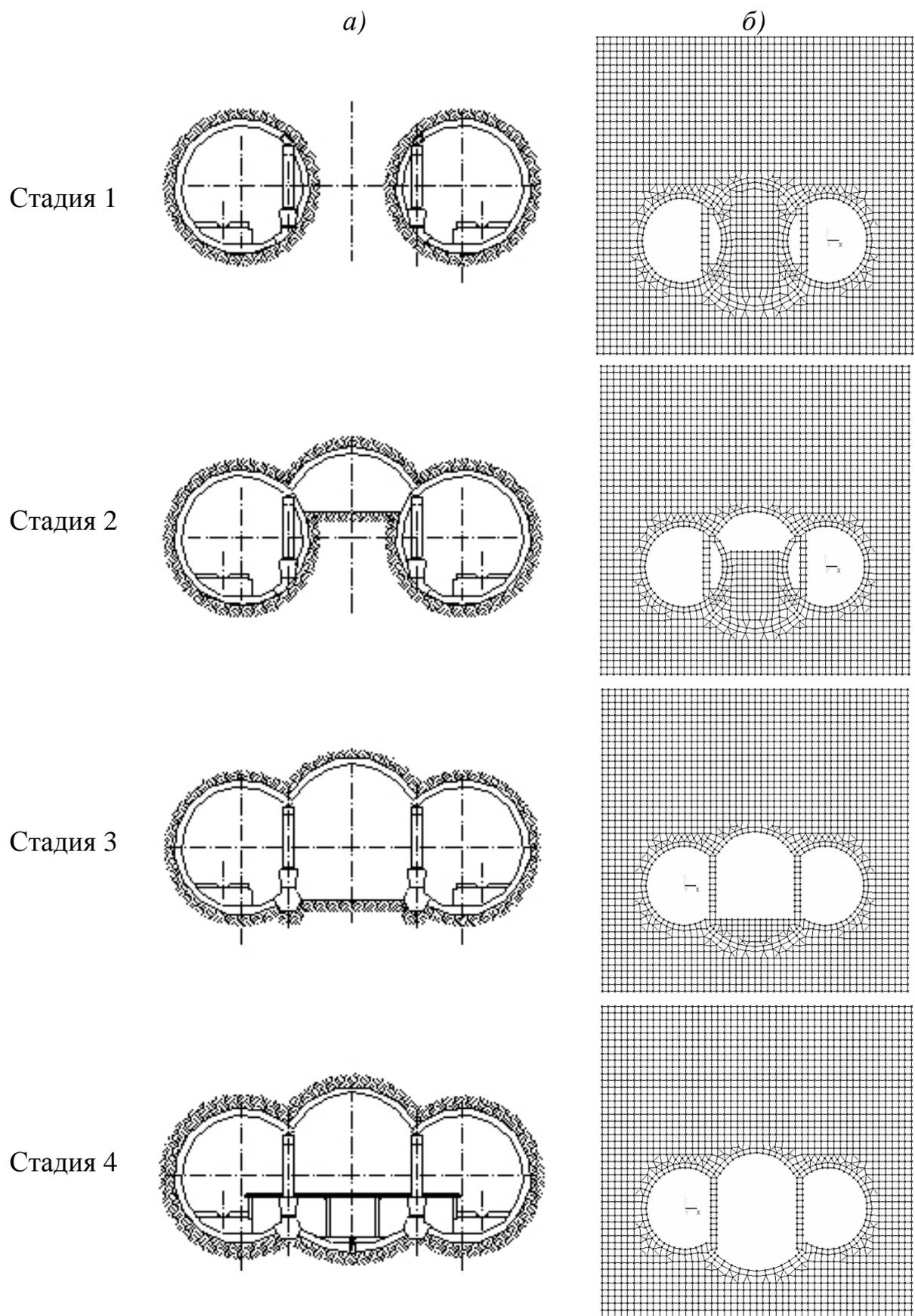


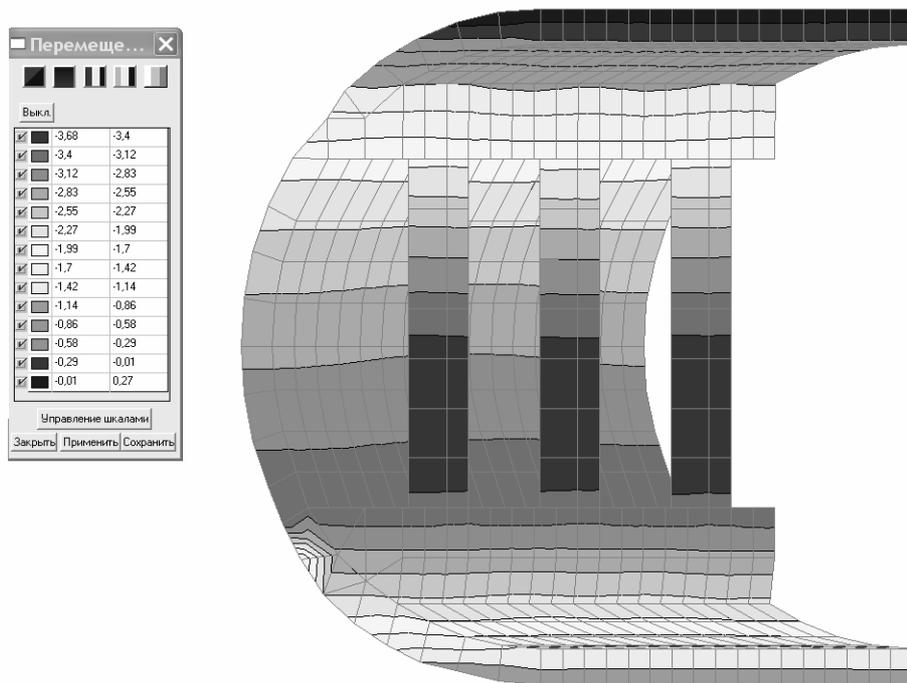
Рис. 1. – Этапы сооружения станции (а) и соответствующие им КЭ-модели (б)

Размеры плоской схемы выбраны таким образом, чтобы максимально приблизить условия работы модели станции к реальному объекту: глубина заложения станции – 50 м; грунт окружающего массива – глина спондиловая, модуль упругости $E=35$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$, плотность $\gamma=1,9$ т/м³; материал конструкций станции железобетон В30, модуль упругости $E=38\,500$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu=0,02$, плотность $\gamma=2,5$ т/м³.

После определения всех необходимых размеров плоских моделей, объемные модели станций получены путем генерации плоских схем, которые находятся в плоскости XZ, в направлении оси Y с шагом 0,6 м. Для объемных моделей заданы соответствующие граничные условия.

Для определения закономерностей формирования НДС стационарной конструкции проанализируем напряженно-деформированное состояние моделей станции на основе данных численного анализа.

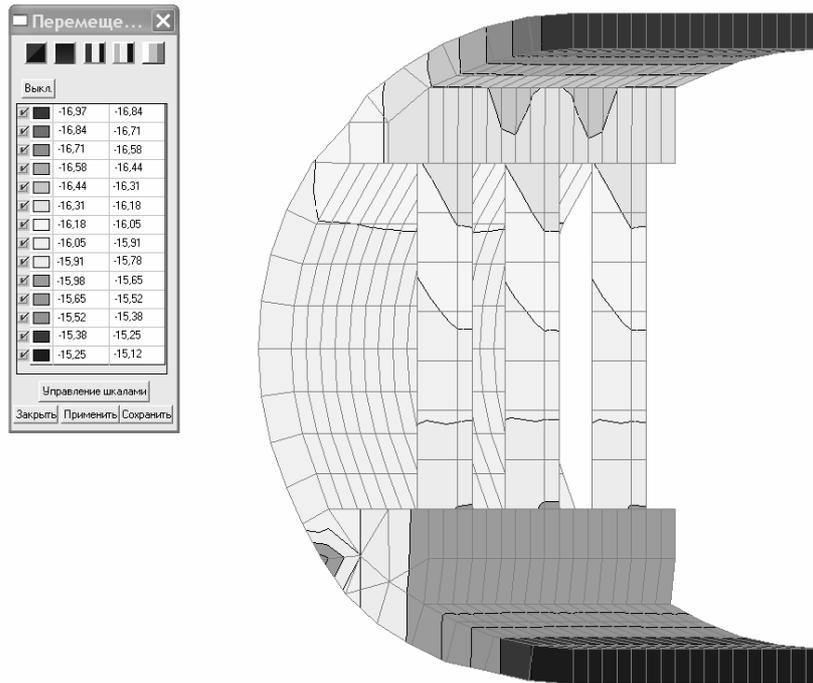
Анализ НДС первого этапа сооружения станции. После проходки боковых тоннелей с отставанием 20...30 м и монтажа обделки колонны значительно деформируются. Значения перемещений несущих элементов (рис. 2), приведенных в таблице 1, значительно зависят от скорости введения в работу несущих элементов в работу и отображают предельное деформированное равновесное состояние боковых тоннелей, когда рост деформаций прекратился. Рассмотренный случай деформированного состояния позволяет в дальнейшем исследовать негативное влияние задержек при монтаже несущих элементов.



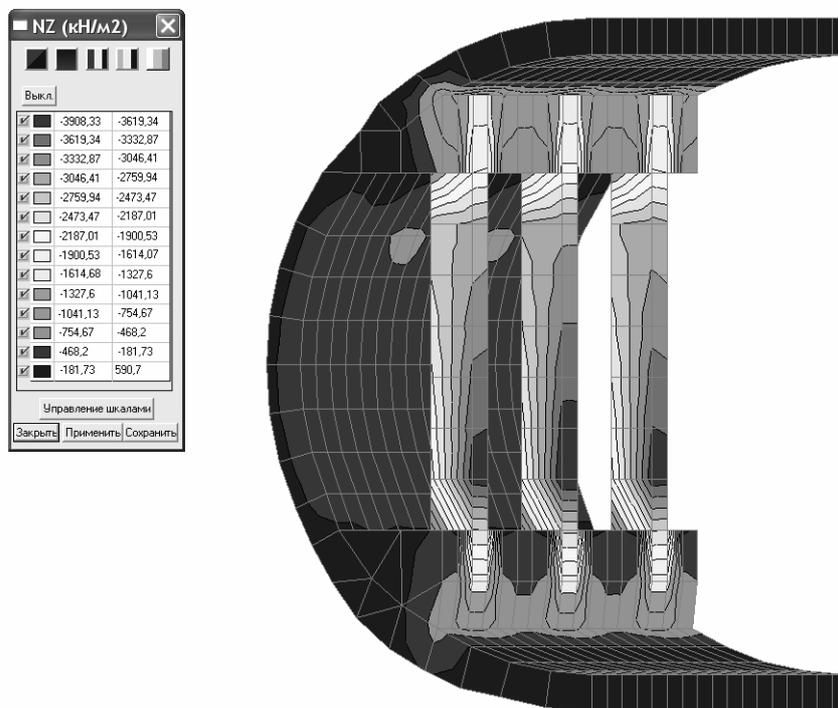
a)

a) перемещения по оси X

Рис. 2. – НДС в несущих элементах



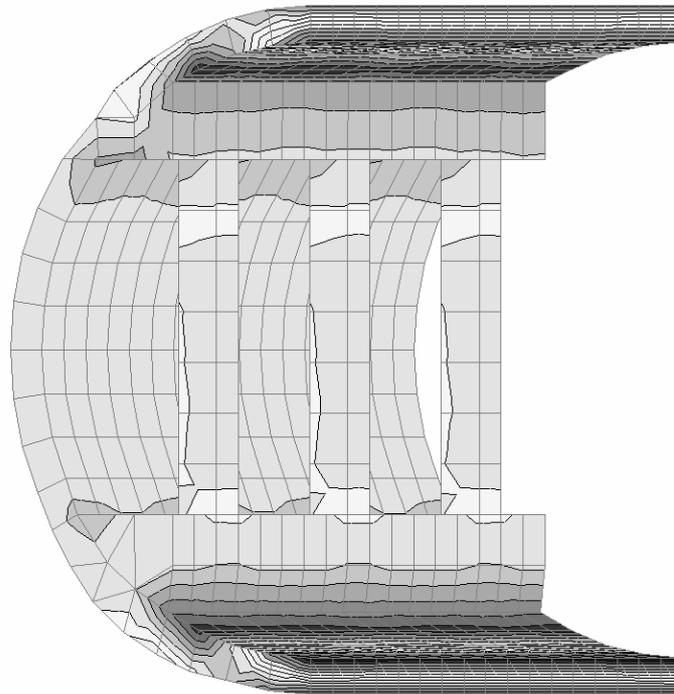
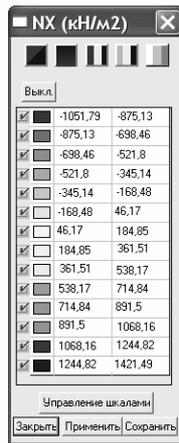
б)



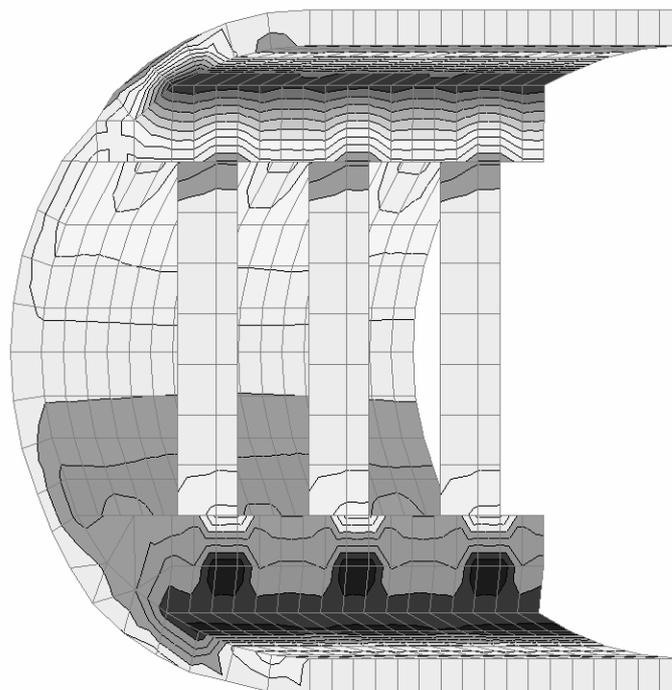
в)

б) перемещения по оси Z; в) нормальные напряжения по оси Z

Рис. 2. – НДС в несущих элементах



з)



д)

з) нормальные напряжения по оси X; д) касательные напряжения в плоскости XZ

Рис. 2. – НДС в несущих элементах

Таблица 1 – Максимальные перемещения элементов станции на сооружения

Несущие элементы станции	Перемещения, мм							
	Вертикальные				Горизонтальные			
	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
Колонны	16,31	15,36	35,64	12,43	3,68	2,97	12,43	3,70
Прогоны	16,44	16,03	35,64	12,43	1,99	1,45	1,78	2,47
Обделка боковых тоннелей	16,97	16,70	35,64	13,96	3,40	5,26	7,71	8,64
Свод среднего тоннеля	–	16,70	35,64	13,65	–	1,45	3,55	2,47
Обратный свод	–	–	–	11,20	–	–	–	3,70

Таблица 2 – Расчет эквивалентных напряжений по четвертой теории прочности

Несущие элементы станции	Нормальное напряжение по оси X, МПа				Нормальное напряжение по оси Z, МПа				Касательное напряжение в плоскости XZ				Эквивалентное напряжение, МПа			
	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
Колонны	-0,2	-0,2	0,82	0,27	-3,9	-0,3	-6,15	-5,8	-0,33	0,39	0,88	0,13	4,011	3,16	5,98	5,71
Прогоны	-0,9	-0,3	0,82	-0,9	-1,9	-0,7	-2,81	-2,5	-0,33	-0,3	-0,4	0,13	2,655	1,05	2,59	3,03
Обделка боковых тоннелей	1,4	1,18	2,46	-1,9	0,6	0,25	-2,05	-3,1	0,054	-0,5	0,88	0,13	2,12	1,56	2,74	4,42
Свод среднего тоннеля	–	1,18	-1,8	1,5	–	0,25	0,422	-1,7	–	-0,5	0,88	0,13	–	1,56	2,24	1,65
Обратный свод	–	–	–	-1,9	–	–	–	-1,7	–	–	–	0,13	–	–	–	3,20

Значительное влияние на перераспределение перемещений в этом случае осуществляется грунтовым массивом среднего пролета, который продолжает воспринимать значительную часть общей нагрузки. За счет нарушения первичного бытового напряженно-деформированного состояния грунтового массива, в нем начинается развитие перемещений, которое усиливается взаимным влиянием боковых выработок.

Обделка остается в значительной степени недогруженной, потому что грунтовой массив стационарного тоннеля еще остается неразработанным, и он воспринимает значительную часть горного давления, препятствуя значительным смещениям обработки, вызванным боковым давлением, в его сторону за счет реактивных усилий, возникающих в грунтовом массиве среднего пролета.

Максимальные величины напряжений в несущих элементах приведены в таблице 2. Для последующего расчета конструкции на прочность, который будет проводиться по бетону, применим формулу четвертой энергетической теории прочности. Наиболее загруженными в этом случае являются колонны.

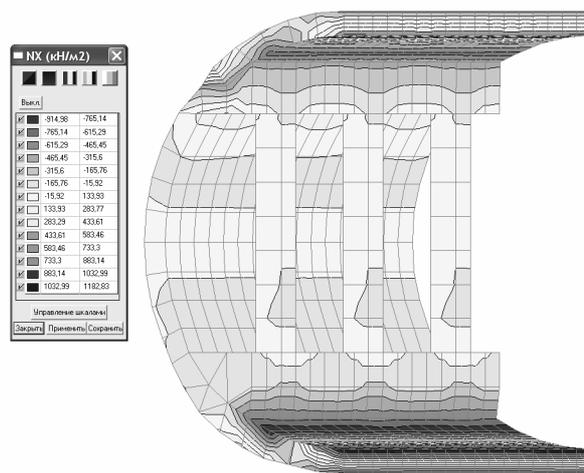
Можно сделать вывод о важности включения в работу колонн сразу же после проходки бокового тоннеля и монтажа обделки уже на первой стадии формирования напряженно-деформированного состояния станции. При этом не менее важным является точность их установки в строго вертикальное положение для исключения появления значительных эксцентриситетов и, как следствие, растягивающих усилий.

Анализ НДС второго этапа сооружения станции. После сооружения свода снимается часть взаимодействия из внутренней части обделки боковых тоннелей за счет удаления части грунта среднего пролета. В результате увеличения общего сечения выработки не только изменяется величина усилий и деформаций в обделке боковых тоннелей, но и происходит их перегруппировка в новой системе с дополнительными сопротивлениями в виде конструкций внутреннего каркаса (колонны с прогонами). Максимальные величины перемещений в несущих элементах приведены в таблице 1. Сооружение среднего свода приводит к увеличению жесткости в поперечном направлении, что способствует уменьшению деформаций и напряжений в несущих элементах внутреннего каркаса (рис. 3).

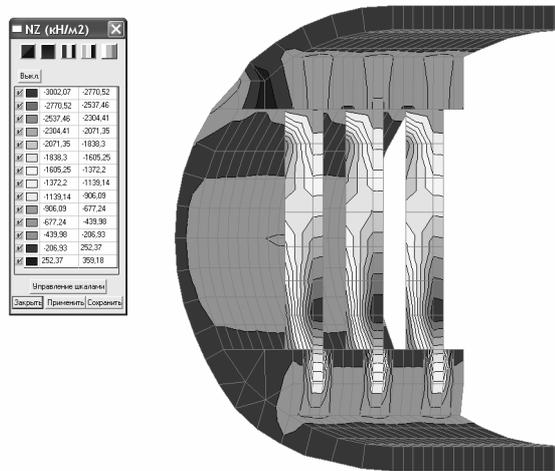
Наиболее деформированной на данном этапе сооружения станции является обделка боковых стационарных тоннелей – максимальные перемещения в ней составляют 16,7 мм.

Максимальные величины нормальных, касательных и эквивалентных напряжений по четвертой теории прочности в несущих элементах внутреннего каркаса на втором этапе сооружения станции приведены в таблице 2.

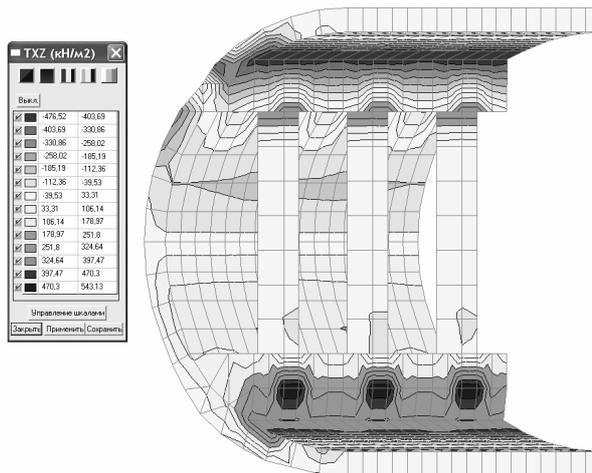
Анализ НДС третьего этапа сооружения станции. Разработка ядра и разборка обделки боковых тоннелей сопровождается интенсивным ростом деформаций и напряжений в несущих элементах внутреннего каркаса.



а)



б)



в)

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

Рис. 3. – Напряжения в несущих элементах:

Следует отметить, что формирование напряженно-деформированного состояния зависит от времени. Приведенные значения перемещений и напряжений отображают сформированное равновесное состояние станции, когда последующее перераспределение отмеченных величин со временем не происходит.

Максимальные значения перемещений и напряжений в несущих элементах на данном этапе сооружения станции приведены в таблицах 5 и 6 (изолинии и изополя НДС третьего и четвертого этапов не приводятся по причине экономии места).

На этом этапе сооружения станции напряжения являются максимальными и значительно перераспределяются. Колонны являются наиболее загруженными несущими элементами, но интенсивная их загрузка именно в этот период положительно отражается на работе свода среднего пролета, который способен воспринять распор боковых тоннелей, растущий по мере разработки ядра.

Анализ НДС четвертого (заключительного) этапа сооружения станции. Максимальные значения перемещений и напряжений в несущих элементах на данном этапе сооружения станции приведены в таблицах 1 и 2.

С увеличением поперечного сечения выработки и после сооружения среднего станционного тоннеля станции основная часть нагрузки распределяется на колонны, которые не встречают значительного сопротивления от подошвы, потому что они не имеют передачи усилий на значительную площадь.

Боковое давление на станционные тоннели также значительно влияет на напряженно-деформированное состояние колонн, вызывая в них растягивающие усилия, благодаря отсутствию необходимой жесткости подошвы в поперечном направлении. Поэтому сооружение обратного свода сопровождается снижением деформаций и напряжений в несущих элементах внутреннего каркаса станции и последующей их стабилизацией.

На этой стадии сооружения очень важным является своевременное включение в работу обратного свода. Преждевременное его включение в работу может привести к последующей концентрации напряжений, что приведет к появлению недопустимых усилий в несущих элементах.

Из приведенных таблиц видно, что эквивалентные напряжения не превышают значения в 6,0 МПа, что свидетельствует о том, что в бетоне несущих элементов не возникает трещин, а сами железобетонные элементы имеют значительный запас прочности.

Из анализа напряженно-деформированных состояний моделей станции можно сделать вывод о важности соблюдения всех технологических процессов по ее сооружению: четкой последовательности работ, необходимой точности монтажа, времени сооружения и ввода несущих элементов в общую работу.

Наиболее ответственными несущими элементами станции на всех этапах ее сооружения являются колонны, которые воспринимают не только основную нагрузку на станцию, но и отвечают за перераспределение напряжений и интенсивность их формирования. Вторым наиболее нагруженным и интенсивно деформирующимся элементом являются прогоны, которые соединяют колонны и обеспечивают станционной конструкции жесткость в продольном направлении.

Из анализа напряженно-деформированного состояния станции в процессе ее сооружения можно сделать вывод о важности учета особенностей технологии работ, которые значительно влияют на формирование и интенсивность роста усилий и перемещений в несущих элементах. Это означает, что при проектировании трехсводчатых станций глубокого заложения с учетом производства работ все необходимые расчеты должны выполняться на максимальные усилия, которые возникают не в стадии эксплуатации станции, а в процессе монтажа несущих элементов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Демешко, Е. А. Современные методы прочностных расчетов в метро- и тоннелестроении [Текст] / Е. А. Демешко, С. Б. Косицын, В. К. Сергеев и др. // Сб. трудов науч.-техн. конф. «Подземное строительство России на рубеже XXI века», Москва, 15-16 марта 2000. – М.: ТАР, 2000. – С. 200-207.
2. Фролов, Ю. С. Система «крепь–грунтовый массив». Численный анализ напряженно-деформированного состояния с учетом технологии проходки тоннелей [Текст] / Ю. С. Фролов, Ю. А. Мордвинков // Метро и тоннели. – 2006. – № 5. – С. 32-35.
3. Чеботаев, В. В. Мониторинг напряженно-деформированного состояния станции «Полянка» в Москве [Текст] / В. В. Чеботаев, Е. В. Щекудов, А. А. Кубышкин и др. // Метро и тоннели. – 2006. – № 5. – С. 36-37.
4. Безродный, К. П. Формирование напряженно-деформированного состояния несущих элементов станции «Комендантский проспект» Санкт-Петербургского метрополитена при строительстве [Текст] / К. П. Безродный // Метро и тоннели. – 2005. – № 3. – С. 42-45.
5. Чеботаев, В. В. Прогнозирование деформаций грунтового массива, зданий и сооружений при проходке Серебряноборских тоннелей [Текст] / В. В. Чеботаев, В. Б. Никоноров, Е. В. Щекудов // Метро и тоннели. – 2005. – № 2. – С. 34-38.
6. Чеботаев, В. В. Прогнозирование деформаций грунтового массива при сооружении тоннелей щитами с активным пригрузом забоя (на примере Серебряноборских тоннелей) [Текст] / В. В. Чеботаев, Е. В. Щекудов, А. Г. Андриянов // Метро и тоннели. – 2007. – № 2. – С. 38-39.
7. Маковский, Л.В. Проходка тоннелей в слабоустойчивых грунтах. Определение параметров мульды осадок земной поверхности [Текст] / Л. В. Маковский, Фам Ань Туан // Метро и тоннели. – 2006. – № 5. – С. 24-25.
8. Зарецкий, Ю. К. Расчет оптимальной величины пригруза забоя при проходке тоннелей ТПМК [Текст] / Ю. К. Зарецкий, М. И. Карабаев // Метро и тоннели. – 2004. – № 2. – С. 40-43.
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. [Текст]. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
10. Большаков, В. И. Основы метода конечных элементов [Текст] / В. И. Большаков, Е. А. Яценко, Г. Соссу и др. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2000. – 255 с.