

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПЕРЕГОННОГО ТОННЕЛЯ МЕЖДУ СТАНЦИЯМИ  
«ЛЫБЕДСКАЯ» – «ДЕМЕЕВСКАЯ»**

В статье представлены результаты сравнительного анализа результатов натурных исследований и математического моделирования перегонного тоннеля и данные адекватности разработанных теоретических построений действительным параметрам.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF RESULTS OF MODEL RESEARCHES  
AND MATHEMATICAL DESIGN OF RUNNING TUNNEL BETWEEN THE  
STATIONS «LYBEDSKAYA» – «DEMEEVSKAYA»**

In the article the results of comparative analysis of objects of model researches and mathematical design of running tunnel are represented and information of adequacy of the developed theoretical constructions to the actual parameters.

**Введение.** Последние три десятилетия в области геомеханики и механики подземных сооружений появилось множество методик прочностных расчетов указанных конструкций, что связано с развитием профессиональных расчетных комплексов на основе компьютерных технологий [1-4]. Однако, важнейшей проблемой является не разработка новых теоретических построений расчета подземных сооружений, а проверка их адекватности действительному сооружению, которое в какой-то степени идеализируется для проведения математического моделирования. Таким образом, определение метода расчета, в котором максимально учтены свойства и параметры исследуемой системы, и который наиболее ей соответствует, является актуальной проблемой геомеханики и механики подземных сооружений.

**Анализ состояния проблемы.** В ряде авторских работ [5-9] были изложены теоретические построения расчета подземных сооружений на основе новых принципов создания моделей, оперирования полученными результатами и оценки поведения крепления при его взаимодействии с окружающим массивом, но доказательств правильности данных построений приведено недостаточно. Поэтому для проведения исследований адекватности разработанных автором теоретических основ комплексного анализа были проведены натурные эксперименты в виде инструментальных измерений деформаций обделки левого перегонного тоннеля между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская» Киевского метрополитена. В дальнейшем было проведено сравнение этих результатов с результатами математического моделирования, в котором были использованы авторские построения. Таким образом, сравнительный анализ результатов натурных испытаний и математического моделирования дает возможность оценить насколько теоретические построения адекватны реальным процессам взаимодействия подземных сооружений и окружающего массива.

**Материал и результаты исследований.** Левый перегонный тоннель между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская» протяженностью около 430 м и укло-

ном 38 % представляет собой железобетонную конструкцию кругового очертания с наружным диаметром 6,04 м и внутренним диаметром 5,5 м и шириной кольца 1,2 м. Все кольца пронумерованы, участок натурных исследований представлял собой часть перегонного тоннеля – от № 45 (станция «Лыбедьская») до № 320 (направление – станция «Демеевская»).

Натурные исследования на участке между кольцами №45-№320 (длина участка 330 м) позволили получить важную информацию о деформированном состоянии обделки перегонного тоннеля.

Описание инженерно-геологических элементов (ИГЭ), в которых залегает перегонный тоннель: ИГЭ 1 – насыпной грунт (песок, супесь, суглинок с содержанием щебня, строительного мусора, битого кирпича); ИГЭ 9 – песок желтовато-серый, мелкий, пылеватый, маловлажный; ИГЭ 11 – супесь желтовато-серая с линзами и прослоями песка, твердая, пластичная; ИГЭ 30 – песок желтовато-серый, мелкий и средней крупности, местами глинистый, с включениями щебня и гравия, средней прочности, водонасыщенный; ИГЭ 73 – глина голубовато-серая мергелистая, с тонкими прослоями песка, сухая (глина спондиловая); ИГЭ 78 – песок серый мелкий, маловлажный.

В табл. 1 приведены характеристики ИГЭ, полученные в лабораторных условиях, кроме ИГЭ 1 (не определялись), ИГЭ 9, 30, 78 (данные получены в ходе исследований при бурении в полевых условиях. Свойства ИГЭ 73 (спондиловая глина) определялись в лаборатории механики грунтов Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики ИГЭ

Номер ИГЭ	Коэффициент пористости $e$	Показатель консистенции	Удельное сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Модуль упругости $E$ , МПа	Плотность $\rho$ , т/м <sup>3</sup>
9	0,55	–	0,004	36	36,0	1,7
11	0,55	0,25< $I_L$ <0,50	0,030	23	21,0	1,7
30	0,55	–	0,003	32	35,0	1,7
73	0,65	0,25< $I_L$ <0,40	0,057	18	90,0	1,9
78	0,55	–	0,004	41	40,0	1,7

На рис. 1-2 приведены графики результатов инструментальных натурных исследований перемещений точек обделки при укладке (монтаже) обделки и за щитовым комплексом, выполненные маркшейдерской службой «Киевметростроя». Основными результатами инструментальных измерений были следующие параметры: 1) отклонение свода в укладке; 2) отклонение свода за комплексом; 3) эллиптичность вертикального диаметра в укладке (монтажная эллиптичность); 4) эллиптичность вертикального диаметра за комплексом; 5) эллиптичность горизонтального диаметра за комплексом; 6) отклонение лотка за комплексом. Эти параметры характеризуют деформированное состояние обделки перегонного тоннеля в период строительства (в укладке, то есть в процессе

монтажа обделки) и в период эксплуатации (за комплексом, то есть в период стабилизации деформаций). Параметры деформирования, измеренные за комплексом, то есть с отставанием от активной зоны работ в 30...40 м, могут считаться практически стабилизированными, так как по времени данное отставание составляет примерно 25...30 суток, а наиболее активное деформирование суглинистых и глинистых грунтов происходит в первые 14...15 суток (подтверждается измерениями и данными работы [10]).

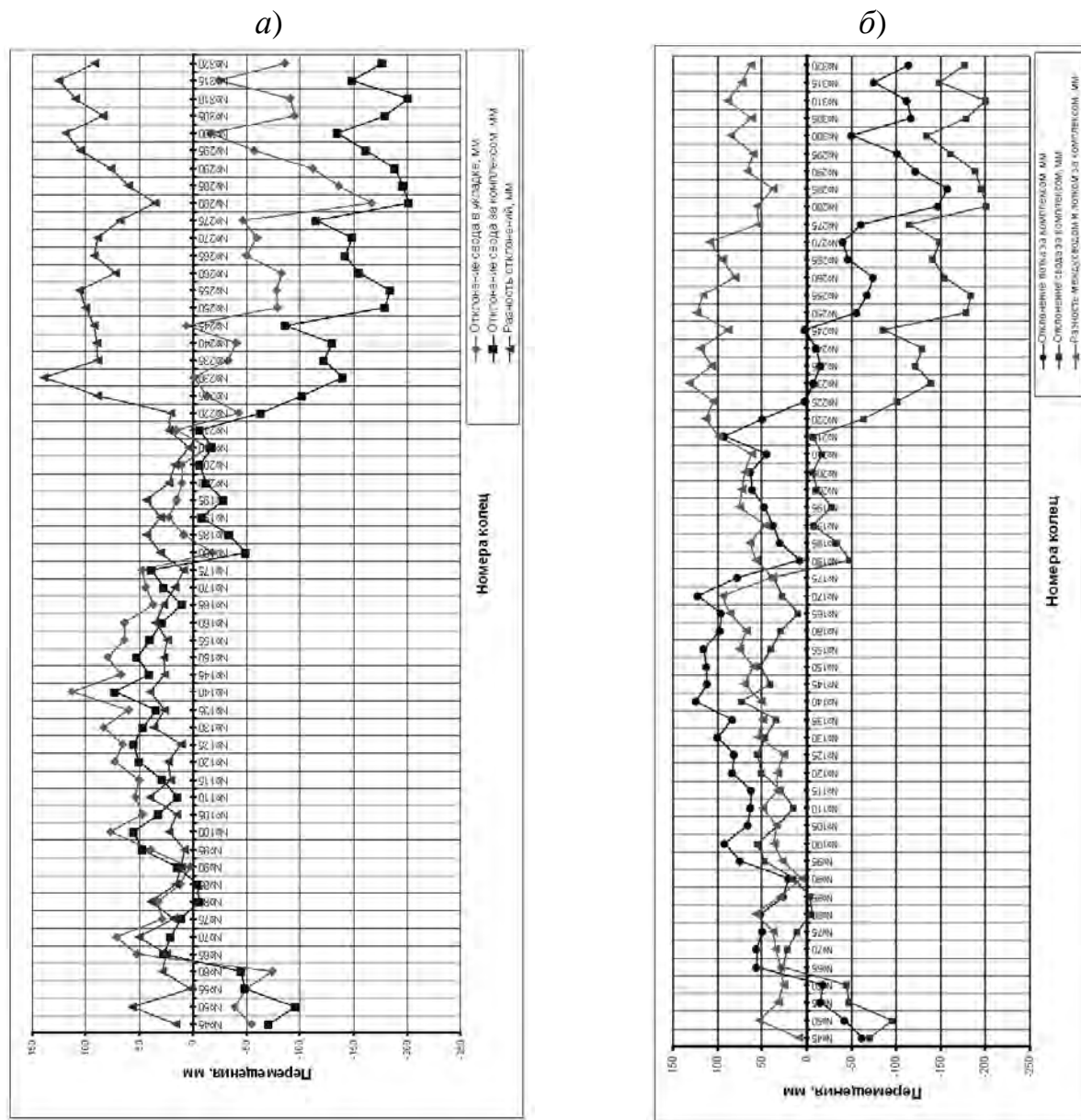


Рис. 1. – Результаты инструментальных исследований перемещений точек свода в укладке и за комплексом (а) и лотка за комплексом (б) в укладке и за комплексом

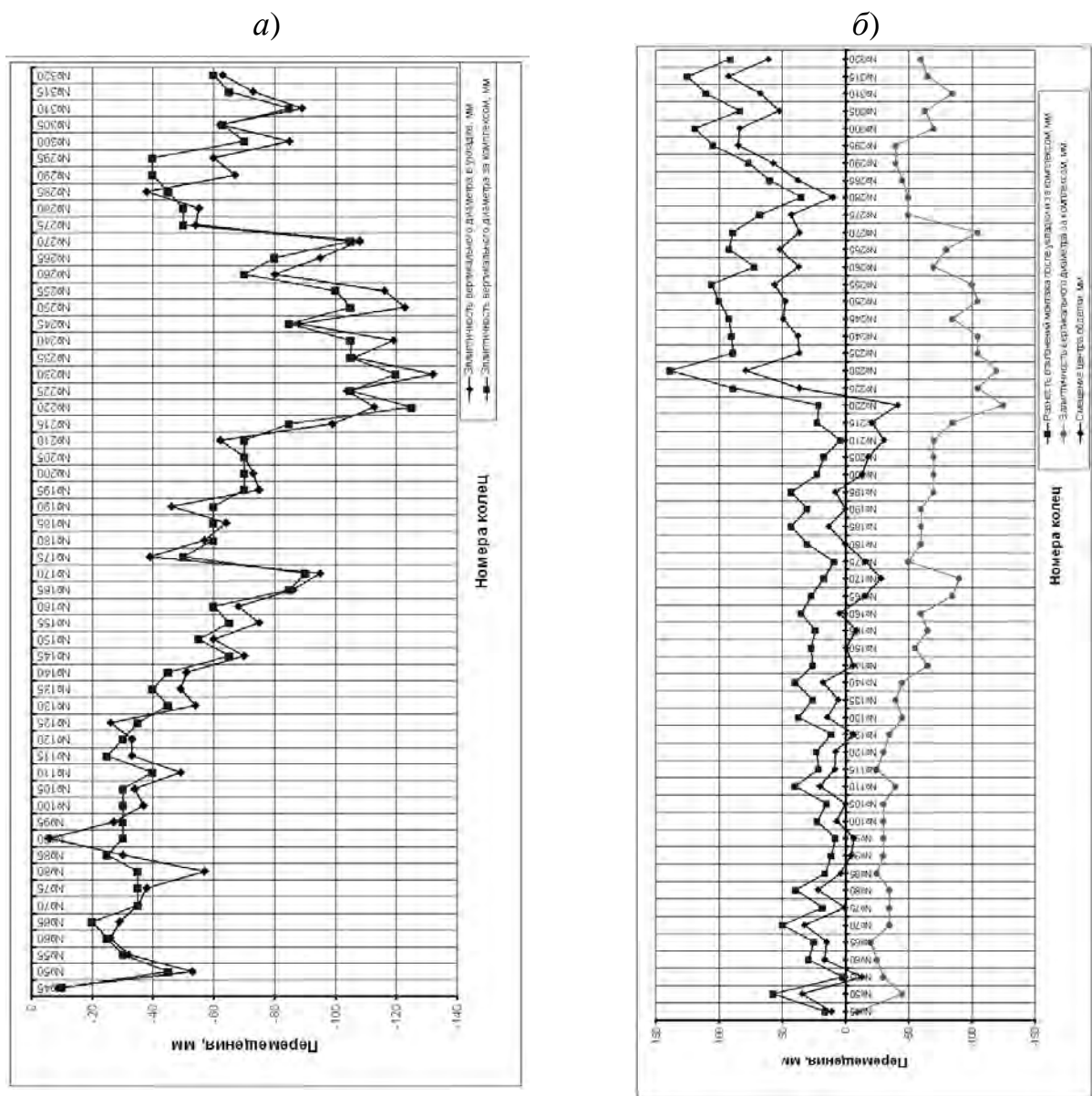
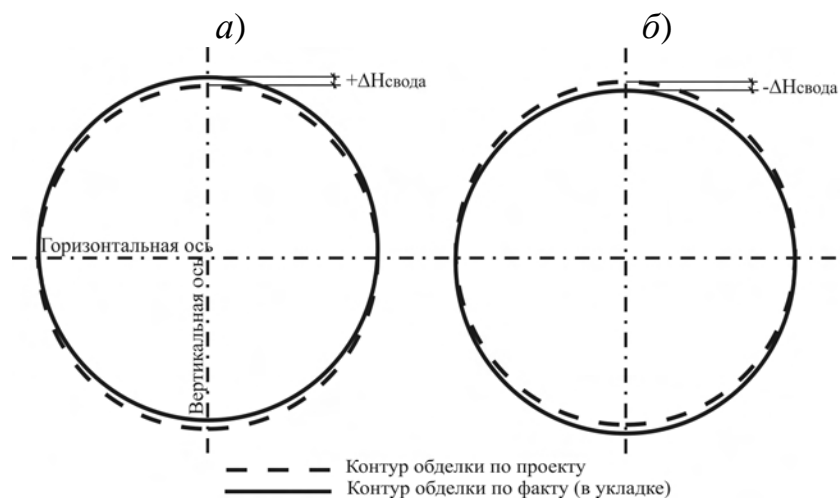


Рис. 2. – Результаты инструментальных исследований эллиптичностей за комплексом и в укладке (а) и смещения центра кольца обделки (б) в укладке и за комплексом

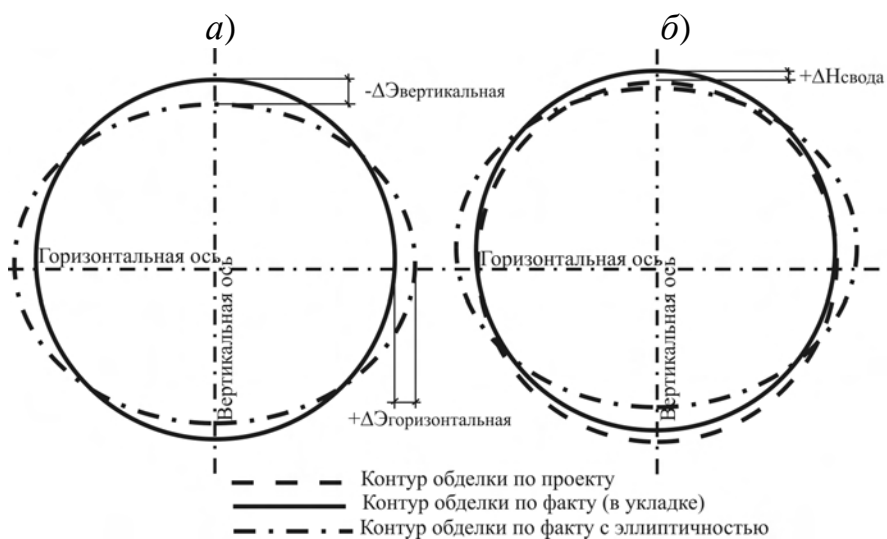
Анализ отклонений свода в укладке и за комплексом (рис. 1, а) даёт возможность сделать вывод, что в процессе взаимного деформирования обделки с окружающим массивом никаких отклонений, противоречащих физике процесса, не выявлено. Однако, процесс монтажа элементов в кольцо иногда проводился на границе требуемых допусков на укладку, нормированных ДБН [11]. На рис. 3 представлены два возможных варианта монтажа кольца обделки: с превышением свода и с занижением, что отражено в знаках отклонения свода (рис. 1). Соответственно, знак «плюс» свидетельствует о том, что свод обделки при монтаже установили выше проектной отметки (рис. 3, а), а знак «минус», что свод установили ниже (рис. 3, б). Из рис. 1 следует, что на участках между

кольцами №140-142 (участок 3,6 м, среднее отклонение свода +113 мм) и №275-290 (участок 18,0 м, отклонение свода -112...167 мм) технология монтажа не соблюдалась, так как значения отклонений свода больше 100 мм, нормированных ДБН [11].



а) с превышением; б) с занижением.  
Рис. 3. – Варианты монтажа кольца обделки

Однако, данный показатель не является окончательным параметром, по которому можно судить о качестве монтажных работ, так как основным параметром является разность значений стабилизированных деформаций (за комплексом) свода и лотка, то есть смещение положения центра обделки (рис. 1, б). Однако, здесь также встречается превышение нормированного значения смещения центра по высоте – на участке между кольцами №220-270 (длина 60 м) значение разности между отклонениями свода и лотка составляет 113...132 мм. Но данный параметр также следует уточнить с помощью параметра эллиптичности (рис. 4).



а) эллиптичность фактического контура; б) полный характер деформаций.  
Рис. 4. – Характер деформирования кольца после стабилизации

Таким образом, кольцо после укладки, получившее отклонение центра, рассматриваемое как разность между отклонениями свода и лотка, вступает во взаимодействие с окружающим массивом и продолжает деформироваться, изменяя монтажную эллиптичность (в укладке) во времени по действием роста горного давления (рис. 4, *a*), параметры которой приведены на рис. 2. Следует уточнить, что эллиптичность образуется и в процессе монтажа (рис. 2, *б*), однако её окончательное стабилизированное значение отмечается в измерениях за комплексом. Как видно из графика вертикальной эллиптичности (рис. 2, *б*), деформации неоднородны по длине колец, что обусловлено различными инженерно-геологическими условиями, однако характер деформации каждого кольца достаточно однороден, что подтверждается видом графика на рис. 2, *a*. Из характера кривых, которые практически симметричны относительно оси абсцисс, можно сделать вывод, что каждое конкретное кольцо деформируется однородно и представляет собой в процессе деформации эллипс с большим диаметром по горизонтальной оси и меньшим по вертикальной. Причем то значение, на которое уменьшился вертикальный диаметр, является приращением горизонтального. Такая ситуация обусловлена равной жесткостью кольца и, соответственно, это является причиной однородности его деформирования.

Анализ изменения вертикальной эллиптичности во времени (в укладке и за комплексом, рис. 2, *б*) даёт возможность оценить влияние горизонтального давления на обделку (а точнее – баланс между вертикальным и горизонтальными компонентами давления), а также выяснить влияние инженерно-геологических условий на взаимодействие массива и обделки. На участках №45-170 (с аномалиями в кольцах №90 и №125), №195-215, №225-285, №190-320 сохраняется устойчивая тенденция к уменьшению вертикальной эллиптичности во времени, то есть примерно через 25...30 суток эллиптичность уменьшается до величин 1...27 мм (последняя величина наблюдается в кольце № 290). Среднее значение уменьшения составляет около 15 мм, то есть примерно 10...20 % от общего значения вертикальной эллиптичности. Это свидетельствует о том, что горизонтальное давление на обделку, постепенно развиваясь во времени, вступает с ней во взаимодействие, определяемое вязко-упруго-пластическими свойствами, и, уменьшая горизонтальную эллиптичность, уменьшает вертикальную. Таким образом, боковое взаимодействие окружающего массива развивается во времени и стремится вернуть кольцу обделки круговое очертание.

Возвращаясь к значениям разности между отклонениями свода в проекте и по факту установки, следует провести их уточнение, так как окончательное смещение центра обделки будет зависеть от значений вертикальной эллиптичности. Соответственно, при постановке кольца в проектное положение с завышением  $\Delta_{\phi}$  и перемещении центра обделки вверх, вертикальная эллиптичность  $\mathcal{E}_{вер}$ , уменьшая вертикальный диаметр, перемещает центр обделки вниз на значение половины вертикальной эллиптичности. Таким образом, положение центра обделки следует определять таким образом: из разности между отклоне-

ниями свода по факту  $\Delta_\phi$  и за комплексом  $\Delta_k$  следует вычесть половину вертикальной эллиптичности  $\mathcal{E}_{вер}/2$  (рис. 5).

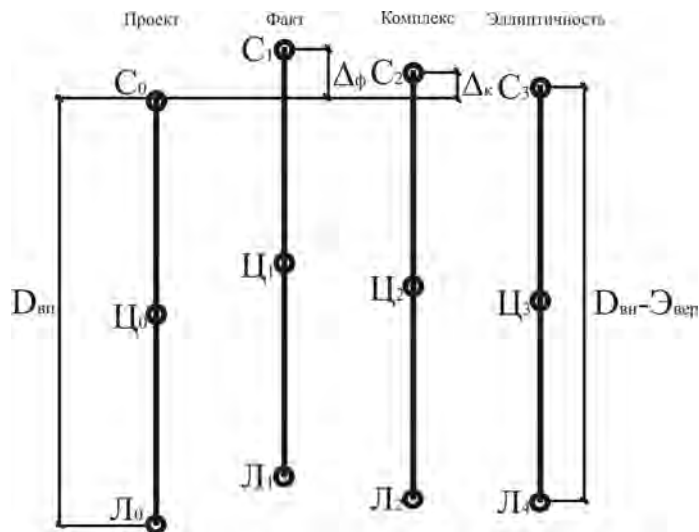


Рис. 5. – Схема для определения положения центра обделки в процессе ее монтажа и дальнейшего деформирования (вид сбоку)

На рис. 2, а представлен график, на котором показана зависимость между разностью отклонений свода и лотка, вертикальной эллиптичностью и положением центра обделки. Из анализа данного графика можно сделать вывод, что после окончания процесса укладки, дальнейшего активного деформирования и стабилизации перемещений обделки максимальное отклонение центра обделки от проектного положения составляет +85 мм (кольцо №295, знак «плюс» означает, что центр кольца лежит выше проектного значения) и -41,5 мм (кольцо №220, знак «минус» означает, что центр кольца лежит ниже проектного значения), а в среднем – около 19...20 мм, что полностью соответствует требованиям, которые выдвигаются к данному параметру ДБН [11].

Таким образом, проведенные исследования инструментальных измерений деформаций обделки перегонного тоннеля между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская» дали возможность проанализировать качественный характер и количественное распределение параметров деформирования обделки по длине. Результаты данного анализа являются первичной информацией по обоснованию теоретических построений, так как их дальнейшее сравнение с результатами математического моделирования позволит сделать вывод о степени их соответствия. Для этого к расчету принято несколько моделей, которые соответствуют разным кольцам левого перегонного тоннеля между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская», что значительно повышает достоверность теоретических построений в случае соответствия результатов математического моделирования на основе принципов комплексного анализа и данных инструментальных исследований параметров перемещений, рассмотренных выше.

К расчету приняты следующие номера колец:

- 1) кольцо № 105 с залеганием – в замке ИГЭ 30, в лотке – ИГЭ 73;
- 2) кольцо № 205 с залеганием – в замке ИГЭ 11, в лотке – ИГЭ 30.

Обделка является железобетонной конструкцией кругового очертания (наружный диаметр – 6,04 м, внутренний диаметр – 5,5 м, ширина кольца – 1,2 м), заобделочное пространство заполнено песчано-цементным раствором (раствор первичного нагнетания, толщина грунтово-цементного слоя – 0,05 м).

Для исследования НДС перегонного тоннеля, создана пространственная модель из объемных элементов, равная по ширине кольцу обделки, в которой учтены влияние пространственного фактора на формирование напряженного состояния, то есть влияние третьей компоненты  $\sigma_y$  на компоненты  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  и наиболее полно воссозданы условия взаимодействия железобетонной конструкции с окружающим грунтовым массивом [6-9]. В модели полностью отображены все геометрические размеры реального перегонного тоннеля, условия его залегания, а также реальные деформационные характеристики грунтов окружающего массива, но не учтены параметры эллиптичности после укладки, то есть кольцо, отображенное в модели, не имеет монтажных погрешностей (вертикальная и горизонтальная эллиптичности в укладке) (рис. 6).

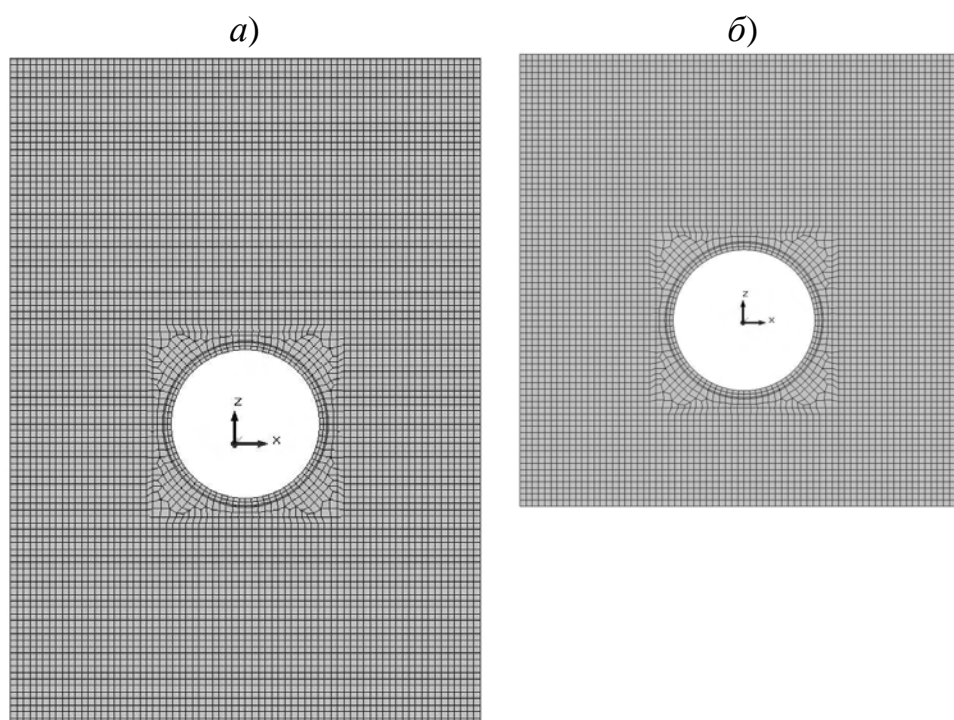
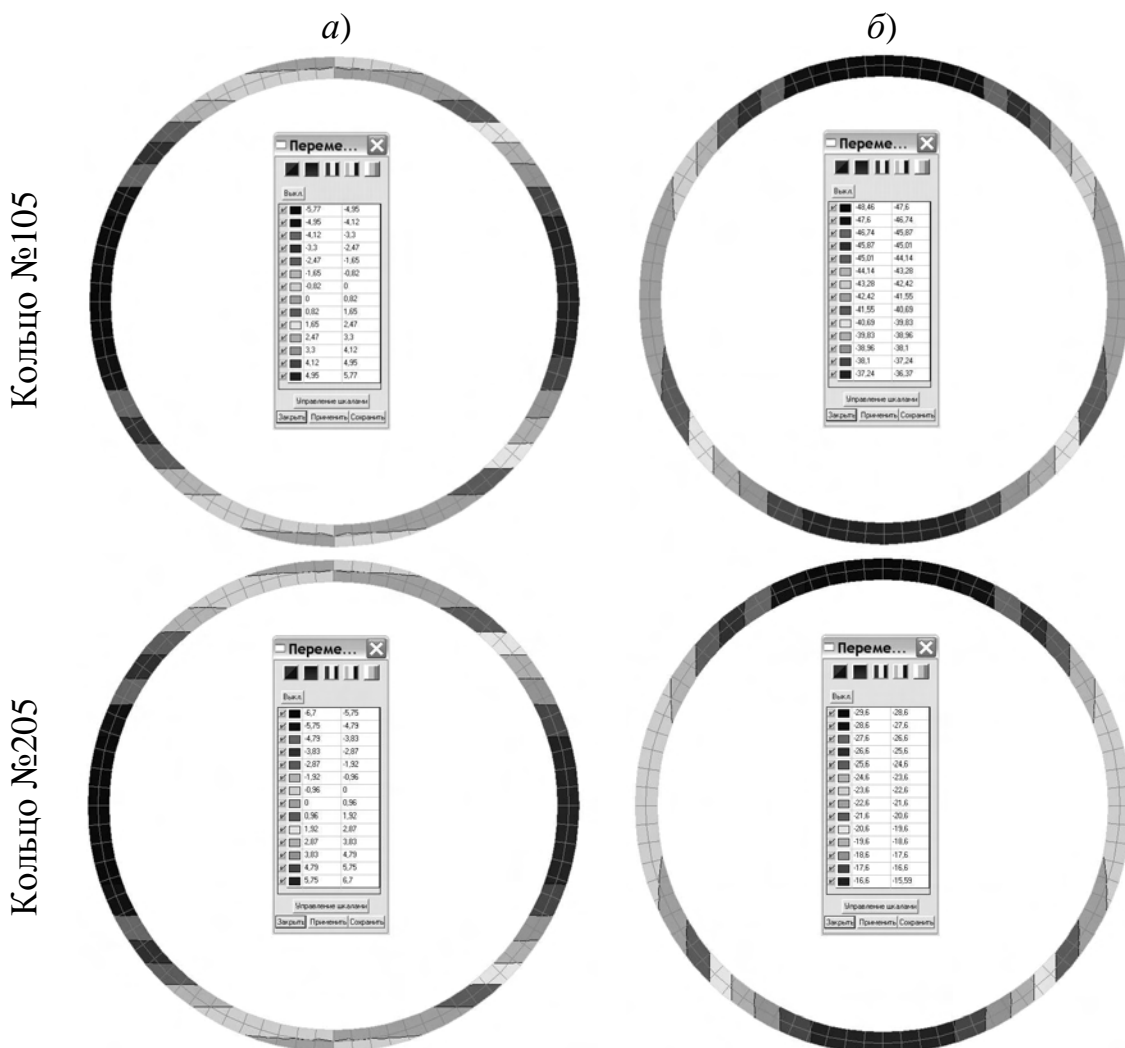


Рис. 6. – Дискретизация КЭ-моделей колец левого перегонного тоннеля между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская»: а) кольцо № 105; б) кольцо № 205

После присвоения деформационных характеристик к модели были приложены граничные условия, и расчет модели проводился на собственный вес. На рис. 7 приведены изополя и изолинии деформированного состояния фрагмента КЭ-модели.





а) перемещения по горизонтальной оси; б) перемещения по вертикальной оси.

Рис. 7. – Деформированное состояние фрагмента КЭ-модели (обделка перегонного тоннеля)

Анализ результатов математического моделирования колец левого перегонного тоннеля между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская» позволил заключить, что примененные при построении конечно-элементной модели данного подземного сооружения авторские теоретические положения, связанные с концепцией комплексного анализа, позволяют наиболее точно учесть взаимодействие конструкции с окружающим массивом и получить адекватные действительности детальные параметры деформированного состояния. Данный тезис подтверждается сравнением результатов инструментальных исследований параметров перемещений колец левого перегонного тоннеля между станциями «Лыбедьская»–«Демеевская» и соответствующих результатов математического моделирования.

Наиболее информативным для доказательства адекватности авторских положений является сравнение вертикальных перемещений, так как в случае инструментальных исследований они более детальны. Так относительные верти-

кальные перемещения для кольца № 105 составили: перемещение свода – 48,46 мм, лотка – 36,37 мм (абсолютное приращение перемещения замка относительно лотка равно  $48,46 - 36,37 = 12,09$  мм); для кольца № 205: перемещение свода – 29,6 мм, лотка – 15,59 мм (абсолютное приращение перемещения замка относительно лотка равно  $29,6 - 15,59 = 14,01$  мм). В случае инструментальных исследований перемещения за комплексом составляют: для кольца № 105 перемещение свода – 32 мм, лотка – 66 мм; для кольца № 205 перемещение свода – 7 мм, лотка – 63 мм (рис. 1, б). Однако, данные параметры представляют перемещения относительно проектной отметки, а точнее – отклонения укладки по факту относительно проекта. Соответственно следует уточнить эти данные путем получения разности между отклонением по факту и отклонением за комплексом (рис. 2, а). Так для кольца № 105 разность между отклонением по факту и за комплексом составляет 15 мм; для кольца № 205 – 17 мм. Относительная погрешность между результатами инструментальных исследований и результатов математического моделирования составляет: для кольца № 105 – 20 %, для кольца № 205 – 17,6 %.

**Выводы.** Таким образом, полученные данные о сравнении параметров инструментальных исследований и результатов математического моделирования свидетельствуют о высокой степени адекватности разработанных авторских положений и действительных параметров реального перегонного тоннеля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Зерцалов, М. Г. Станция «Алмалы» Алматинского метрополитена. Применение методов математического моделирования при расчете вестибюля [Текст] / М. Г. Зерцалов, Д. В. Устинов, В. Е. Меркин // Метро и тоннели. – 2006. – № 5. – С. 30-32.
4. Козин, Е. Г. Исследование процесса сдвижения земной поверхности на участке между станциями «Лесная» и «Площадь Мужества» в Санкт-Петербурге [Текст] / Е. Г. Козин, Б. М. Савков, В. П. Хуцкий // Метро и тоннели. – 2006. – № 4. – С. 32-35.
5. Петренко, В. І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
6. Петренко, В. І. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкін. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – 252 с.
7. Петренко, В. Д. Пространственный расчет станции метрополитена с интерпретацией окружающего массива как упруго-вязко-пластического [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкін. // Геотехнічна механіка. – Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ ім. М.С. Полякова, 2002. – Вип. 40. – С. 194-202.
8. Петренко, В. Д. Анализ реологических явлений вокруг выработки кругового очертания [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкін. // Будівництво. – Дніпропетровськ: Вид-во ДПТУ, 2002. – Вип. 11. – С. 33-37.
9. Тютюкін, О. Л. Теоретичні основи визначення напружено-деформованого стану глинистого породного масиву як в'язко-пружно-пластичного середовища [Текст] / О. Л. Тютюкін. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ: Вид-во ДПТУ, 2008. – Вип. 21. – С. 201-206.
10. Заворицкий, В. И. Проектирование подземных транспортных сооружений [Текст] / В. И. Заворицкий. – К.: Будівельник, 1975. – 204 с.
11. ДБН В.2.3-7-2003. Метрополітени [Текст]. – Київ: Держбуд України, 2003. – 300 с.