

УДК 69.04

Ю.С.ФРОЛОВ, д-р техн. наук, профессор, *fus.frolov@yandex.ru*
А.Н.КОНЬКОВ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, *pgupstm@yandex.ru*
А.А.ЛАРИОНОВ, заведующий лабораторией, *aalarionovaa@yandex.ru*
Петербургский государственный университет путей сообщения

Yu.S.FROLOV, Dr. in eng. sc., professor, *fus.frolov@yandex.ru*
A.N.KONKOV, PhD in eng. sc., senior research assistant, *pgupstm@yandex.ru*
A.LARIONOV, laboratory head, *aalarionovaa@yandex.ru*
Petersburg State Transport University

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ХОДЕ НАУЧНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА В УСЛОВИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Изложены принципы моделирования статической работы подземных конструкций методом эквивалентных материалов. Рассмотрены примеры исследований на моделях напряженно-деформированного состояния подземных сооружений Петербургского метрополитена с учетом технологии их сооружения. Приведены результаты выполненных работ, отмечается их практическая значимость.

Ключевые слова: подземные сооружения, моделирование, эквивалентные материалы, исследования НДС, результаты.

PHYSICAL MODELING DURING SCIENTIFIC FOLLOWING OF SUBWAY STRUCTURES UNDERGROUND CONSTRUCTION IN CONDITION OF SAINT PETERSBURG

Principles of underground construction static work modeling by equivalent material method. Examples of researches of underground constructions, considering build technology, by deflected mode modeling. Results of accomplished work and their practical importance were mentioned.

Key words: underground construction, modeling, equivalent material, research of deflected mode, results.

Новизна и нестандартность многих реализованных при строительстве Санкт-Петербургского метрополитена сооружений потребовали принятия таких конструктивно-технологических решений, для которых недостаточно, а зачастую и невозможно было использовать метод аналогий. Большое значение в таких случаях приобретают научные методы исследований, позволяющие обоснованно принимать оптимальные инженерные решения. Такими методами являются математический анализ и физическое моделирование.

Сложность математического анализа работы сооружений вынуждает прибегать к различного рода допущениям, идеализирующими действительную физическую картину явления. Однако достоверность и точность решения задачи определяется, прежде всего, обоснованностью допущений, принятых в базовой расчетной схеме, и степенью соответствия этой схемы условиям работы реальной конструкции.

Вопрос о корректном использовании той или иной расчетной схемы успешно решается с помощью методов физического

моделирования. Исследования на физических моделях для проверки теоретической интерпретации процесса взаимодействия подземной конструкции с окружающим грунтом или для определения возможных грубых ошибок и неверных допущений особенно эффективны, когда их применяют для прогнозирования поведения сооружений необычных конструктивных решений или сооружений, построенных по новой, ранее не применяемой в данных инженерно-геологических условиях технологии. В этом случае экспериментальные исследования на моделях, как правило, имеют приоритет перед теоретическими, поскольку они создают основу для объективной математической интерпретации исследуемого процесса.

При изучении напряженно-деформированного состояния тоннельных конструкций и характера их взаимодействия с окружающим грунтом широко используют метод физического моделирования с помощью эквивалентных материалов.

Моделирование методом эквивалентных материалов основано на замене естественных грунтов натуры и материалов конструкции такими искусственными материалами в модели, показатели физико-механических свойств которых находятся в определенных соотношениях с аналогичными показателями тех же свойств натуры. Эти соотношения определяются на основании общих положений теории механического подобия и обеспечивают аналогию процессов, протекающих в натуре и в модели под действием гравитационных сил. Метод эквивалентных материалов позволяет на крупномасштабных моделях с максимальным приближением к натуре отразить основные характеристики грунта и особенности структурного строения грунтового массива, воспроизвести детали и узлы конструкции. Моделирование эквивалентными материалами как метод научного познания характерено тем, что в этом случае возможны не только инструментальные измерения искомых параметров, но и визуальные наблюдения. Объект можно довести до разрушения, что дает опытному исследователю ценнейшую информацию о характере статической работы изучаемой конструкции и отдельных ее узлов.

Теоретическую основу моделирования составляют законы теории подобия. Главное общее требование моделирования – это соблюдение принципа подобия, согласно которому подобные друг другу явления имеют подобные условия однозначности и одинаковые определяющее критерии подобия*. Подобие условий однозначности определяется следующими характеристиками: подобием геометрических параметров модели и натуры; пропорциональностью физических констант; соответствием начальных состояний; подобием условий на границах системы в период изучения процесса.

Для каждой конкретной задачи, решаемой методом моделирования, прежде всего должны быть выделены главные факторы, определяющие исследуемый процесс, и обоснованы условия проведения опыта. Все это осуществляется на основе анализа инженерно-геологических и производственных условий в сочетании с научным подходом к планированию числа экспериментов и изучаемых параметров в каждом из них. Значительно упрощаются подбор материалов-эквивалентов, технология проведения эксперимента и анализ его результатов, если выполнять требования подобия по отдельным показателям, которые являются определяющими в изучаемом процессе.

Лаборатория моделирования тоннелей кафедры «Тоннели и метрополитены» ПГУПС за годы своего существования провела значительное количество исследований на моделях как новых конструкций подземных сооружений метрополитена, так и технологий их сооружения. К ним относятся исследования напряженно-деформированного состояния новых конструкций станций метрополитена, эскалаторных тоннелей из монолитного железобетона и выработок различного назначения с учетом технологии их сооружения.

Одной из наиболее значительных работ по исследованию новых конструкций станций метрополитена являлось исследование первой в России объединенной двухъярус-

* Моделирование в геомеханике / Ф.П.Глушихин, Г.Н.Кузнецов, М.Ф.Шклярский и др. М., 1991.

Modeling in geomechanics / F.P.Glushikhin, G.N.Kuznetsov, M.F.Shklyarskiy and others. Moscow, 1991.

ной односводчатой станции «Спортивная», возведенной в протерозойских глинах.

Исследования проводились методами физического моделирования, на моделях из эквивалентных материалов.

Прочностные и деформативные характеристики моделей грунта и обделки подбирались в соответствии с критериями подобия, полученные для масштаба 1:50.

В процессе экспериментов фиксировались следующие параметры напряженно-деформированного состояния конструкции: деформации сводов, осадки опор; напряжения на контакте между грунтовым массивом и обделкой в различных точках верхнего и обратного сводов, на поверхности опор и под ними; величины нормальных сил в сводах. Перечисленные параметры являются основными и достаточными для оценки напряженно-деформированного состояния односводчатых конструкций.

В ходе всех операций по проходке выбиралась технология работ, принятая на соответствующих этапах строительства станции в натуре с учетом масштаба времени.

На рис.1 приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния станции. Установлено, что при нагрузке от полного веса столба грунта над

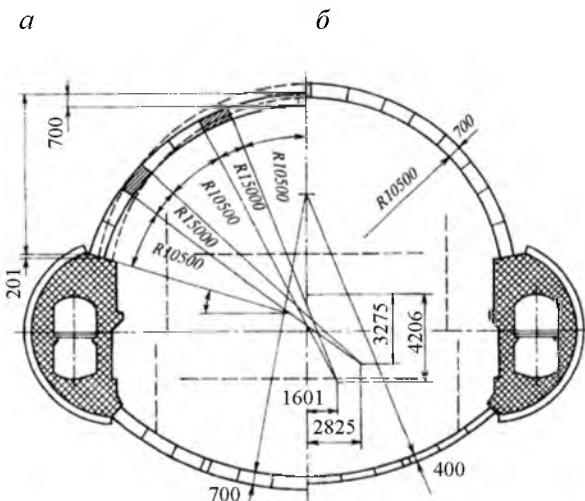


Рис.2. Конструкция обделки двухъярусной объединенной пересадочной станции: *а* – откорректированная по результатам исследований; *б* – первоначальная

станцией, равной 1,0 МПа (бытовая нагрузка), смещения элементов конструкции невелики и находятся на уровне величин, зафиксированных в ранее реализованных промежуточных односводчатых конструкциях с разницей в 10-17 %. Перемещения опор в точках примыкания сборных конструкций незначительны по величине (32 мм вертикальные и 21 мм горизонтальные, направленные в сторону массива грунта) и не оказывают заметного влияния на статическую работу внутренних конструкций. Наибольшие значения напряжений на контакте обделки с грунтовым массивом зафиксированы под опорами и составили 1,9 МПА.

Анализ напряжений на контакте обделке и грунтового массива позволил сделать вывод, что принятая в проекте подъемистость верхнего свода приводит к неравномерному загружению опор по периметру и значительному нагружению обратного свода в зоне опирания. По итогам исследований в проект станции были внесены изменения (рис.2). Конструкция верхнего свода кругового очертания была приведена к коробовому путем замены четырех блоков в арке на блоки большего радиуса ($R = 15$ м). Благодаря этому свод стал менее подъемистым (угол раскрытия уменьшился от 160 до $146^{\circ}36'$). Сечение блоков обратного свода было увеличено с 400 до 700 мм.

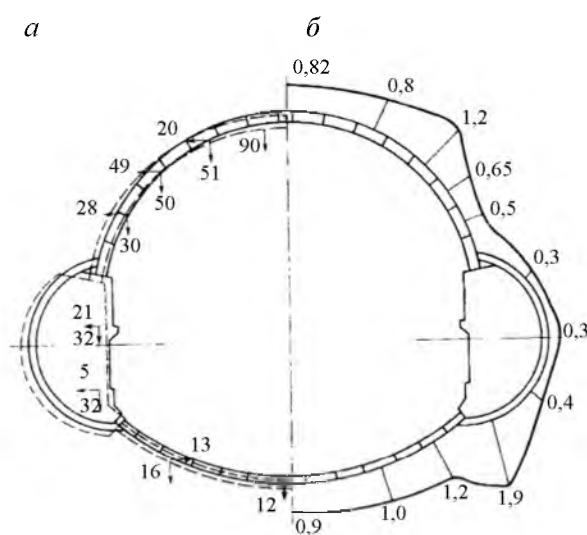


Рис.1. Характер напряженно-деформированного состояния конструкции при бытовой нагрузке: *а* – смещения, мм; *б* – контактные напряжения, МПа

Одной из важных и актуальных работ являлся комплекс исследований по технологии опережающей крепи, примененной при сооружении станции «Адмиралтейская».

Опыт сооружения колонных станций этого типа показал, что основная доля осадок земной поверхности приурочена к стадии сооружения калоттной прорези среднего зала и монтажа в ней верхнего свода. Разработка калоттной прорези традиционно производится вручную отбойными молотками с временным креплением лба забоя металлическими трубами с деревянной затяжкой. Крепление кровли в пределах разрабатываемого кольца свода производится марчеванами. Таким образом, довольно длительное время грунт лба забоя и кровли выработки в пределах заходки находится на временной деревянной податливой крепи и получает возможность разуплотнения и смещения в выработку. Именно этим временным промежутком нахождения выработки на временной крепи до монтажа и обжатия верхнего свода и объясняется интенсивное развитие осадок над средним залом колонной станции. Осадки и разуплотнение грунта при этом могут происходить вплоть до момента нагнетания и твердения цементного раствора за смонтированное и обжатое кольцо свода.

Минимизация осадок дневной поверхности при проходке среднего зала колонной станции возможна при применении опережающей бетонной крепи, устроенной в прорези по периметру лба забоя. Бетонная крепь представляет собой перемежающиеся с нахлестом друг на друга козырьки, опережающие продвижение лба забоя на определенную величину и препятствующие разуплотнению грунта и смещению его в выработку в кровле, одновременно снижая уровень напряжений в грунте лба забоя.

Характер формирования нагрузок на опережающую крепь при проходке калоттной прорези среднего зала станции и оценка ее напряженно-деформированного состояния производились на физических моделях из эквивалентных материалов. В ходе всех операций по проходке тоннелей станции, монтажу элементов конструкции и устрой-

ства опережающей крепи имитировалась последовательность и технология работ на соответствующих этапах строительства станции в натуре.

В результате исследований получены зависимости вертикальных смещений грунтового массива над средним залом станции и путевыми тоннелями на различных этапах сооружения станции. Для установления степени влияния устройства опережающей крепи на величину смещений грунтового массива было выполнено сравнение с данными, полученными В.И.Ларионовым при моделировании колонной станции того же типа с проходкой среднего зала с обычным креплением кровли калотты.

По результатам анализа выявлено, что при проходке калоттной части станции с применением опережающей крепи характер и величина смещений грунтового массива, непосредственно прилегающего к сводам станции, существенно изменяются. Так, над сводом среднего зала вертикальные смещения сразу после раскрытия забоя составляют всего 15 мм и, плавно нарастаая на всех последующих этапах строительства станции, не превосходят 60 мм. В то же время эти смещения без устройства опережающей крепи резко увеличиваются на каждом из этапов сооружения станции, достигая максимальной величины 150 мм. В меньшей степени устройство опережающей крепи ограничивает смещения кровли боковых тоннелей, однако и здесь их величина уменьшается на 30-40 %. Анализ результатов тензометрии показал, что оболочка опережающей крепи в основном сжата как в продольном, так и в попечерном направлении.

Исследованная технология была успешно применена в ходе строительства станции «Адмиралтейская». В ходе сооружения станции проводились исследования осадок зданий, расположенных в пределах прогнозируемой мульды оседания станции. Величины осадок при строительстве станции были значительно меньше, чем при сооружении станций по традиционной технологии и практически полностью совпали со значениями осадок, полученных в ходе исследования станции на моделях.

С целью внедрения новых «безсадочных» технологий проходки и конструкций крепления выработок подземных сооружений метрополитена были выполнены исследования новых конструктивно-технологических решений при проходке подходной выработки от станции «Бухарестская» к шахте № 620 и станционного тоннеля станции «Спасская».

Специалистами ЗАО «СМУ-17 Метрострой» и ОАО «Ленметрогипротранс» был разработан проект экспериментальной подходной выработки пролетом 7,3 м и высотой 9,53 м, залегающей на глубине около 70 м в протерозойских глинах. Особенностью предложенного решения является крепление кровли в виде экранов из труб, заполненных цементно-песчаным раствором, лоб забоя крепится фиберглассовыми анкерами. Анкеры устраиваются в скважинах, пробуренных параллельно оси тоннеля. После установки анкеров скважины заполняются цементно-песчаным раствором. Выработка раскрывается заходками с установкой поддерживающих металлических арок.

В ходе моделирования подходной выработки, учитывая необходимость детального воспроизведения элементов крепи, масштаб моделирования принят равным 1:20. Схема построения модели приведена на рис.3.

В ходе эксперимента выполнялись наблюдения за деформациями и смещениями элементов конструкции временной крепи и окружающего грунтового массива. Для этого стенд был оснащен системой индикаторов, позволяющей количественно оценить характер смещений кровли выработки и устойчивость забоя на разных стадиях проходческого цикла.

После завершения проходки нагрузка на модель составляла $0,2 \gamma H$. Анализ данных экспериментальных исследований показал, что при проходке выработки максимальные смещения лба забоя не превышают 11 мм, кровли – 8 мм. Здесь и далее результаты моделирования представлены в пересчете на натуральную. Максимальные контактные напряжения под пятами арок составили 0,73 МПа, что не превышает предела длительной прочности протерозойских глин. Это свидетельствует о достаточной надежности принятой схемы разработки и крепления выработки.

С целью определения запаса несущей способности временной крепи в пределах разработанного 8-метрового участка калотты и 4-метрового незакрепленного участка уступа модель последовательно нагружалась ступенями до $0,85 \gamma H$.

При дополнительном загружении модели до $0,3 \gamma H$ максимальные смещения лба

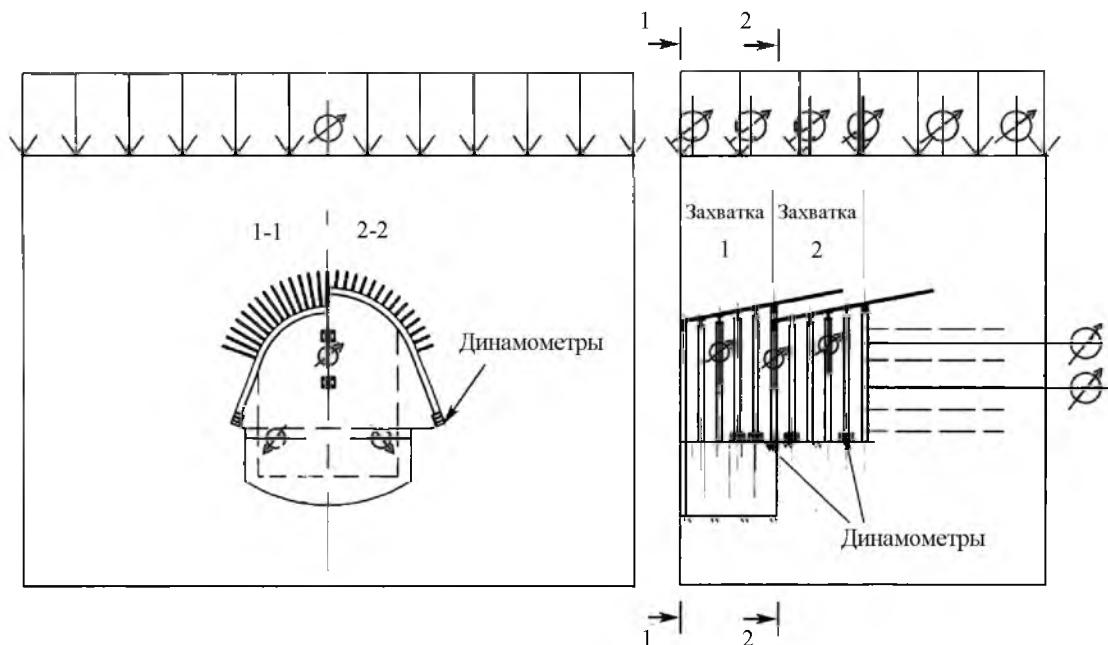


Рис.3. Схема модели с измерительным оборудованием

забоя составили 18 мм (в нижней части забоя калотты), кровли – 9 мм (в пределах 1-го участка), контактные напряжения под пятами арок – 1,0 МПа.

Однако при дальнейшем загружении модели до $0,5 \gamma H$ максимальные смещения лба забоя составили 35 мм (в нижней части забоя калотты), кровли – 18 мм (в пределах 1-го участка), контактные напряжения под пятами арок – 1,3 МПа. Таким образом, до суммарной нагрузки на модель до $0,5 \gamma H$ максимальные смещения лба забоя калотты и кровли выработки увеличиваются незначительно, а контактные напряжения под наиболее нагруженными арками не превышают предела длительной прочности протерозойских глин.

При загружении модели до суммарной нагрузки $0,7 \gamma H$ максимальные смещения лба забоя и кровли выработки увеличились и составили соответственно 40 и 20 мм, однако разрушение модели не произошло, хотя напряжения под пятами арок в пределах первого участка составили 1,53 МПа, т.е. превысили предел длительной прочности протерозойских глин. Нагружение модели до нагрузки $0,85 \gamma H$ привело к резкому увеличению смещений лба забоя (до 50 мм), осадок кровли (до 33 мм в пределах 2-го участка). Контактные напряжения под пятами арок составили 1,8-2,1 МПа, что на 30 % превышает предел длительной проч-

ности протерозойских глин. После кратковременной выдержки модели под этой нагрузкой произошло разрушение грунта под пятами арок и резкие осадки системы временной крепи в пределах первого участка (в зоне разработанного уступа). При этом разрушения системы временной крепи на призабойном участке не наблюдалось. Графики развития деформации грунтового массива представлены на рис.4.

Таким образом, результаты испытания модели позволяют сделать заключение о том, что принятая система временной крепи обеспечивает устойчивость кровли и лба забоя в течение длительного времени при нагрузках, более чем в три раза превышающих проектную.

В результате проведенных исследований рекомендовано оптимизировать сечение с учетом реальной нагрузки, либо увеличить шаг их установки. Кроме того, было принято решение увеличить заходку в два раза и на 30 % уменьшить переходсты анкеров крепи лба забоя.

В ходе исследований конструктивно-технологических особенностей крепления станции «Спасская» были выполнены исследования на двух моделях:

1. Забой закреплен по традиционной схеме крепления выработок кругового очертания диаметром 8,5 м, пройденных в протерозойских глинах.

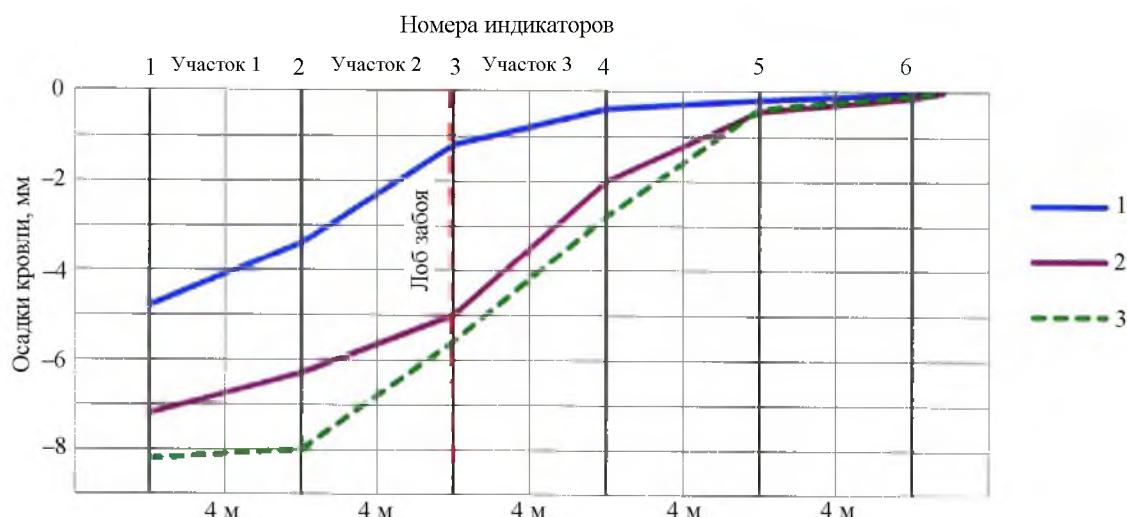


Рис.4. Осадки кровли выработки на этапах раскрытия 1-го участка (1), 2-го (2) и разработки уступа (3)

2. Забой закреплен с применением буроинъекционных скважин устроенных в грунтовом массиве из плоскости забоя вдоль оси тоннеля, часть из которых предназначена для дополнительного крепления расстрелов.

Оба эксперимента проведены в условиях, близких к реальным – пониженная кровля протерозойских глин над выработкой 5 м.

С целью оценки эффективности крепи в обоих экспериментах фиксировались:

- осадки на уровне кровли протерозойских глин как непосредственно над забоем, так и вблизи выработки;

- смещения расстрелов и лба забоя;

Первая модель традиционной технологии была выполнена в соответствии классическими приемами раскрытия и крепления выработки.

Вторая модель выполнялась в последовательности и с учетом дополнительного крепления лба забоя, принятого в проекте:

- проходка станционного тоннеля и монтаж двух колец постоянной обделки;

- устройство опережающих буроинъекционных скважин из плоскости забоя;

- проходка выработки на очередную заходку на величину 1400 мм в пересчете на натуру. По мере разработки каждого яруса устраивались элементы временной крепи (затяжка кровли, подсводная арка, устройство расстрелов, опорных башмаков, забирки и расклиника забоя).

Законченные в проходке модели поэтапно загружались нагрузкой, имитирующей вес четвертичных отложений. Загружение осуществлялось ступенями по $0,2 \gamma H$, где γH – полная нагрузка на кровлю протерозойских глин от слоя четвертичных отложений над выработкой.

По результатам нагружения моделей определены зависимости осадок кровли протерозойских глин в створе по оси выра-

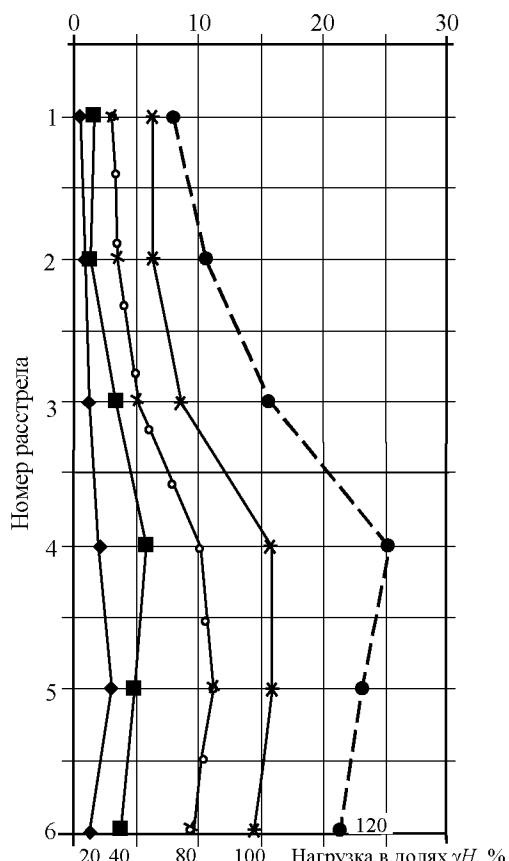
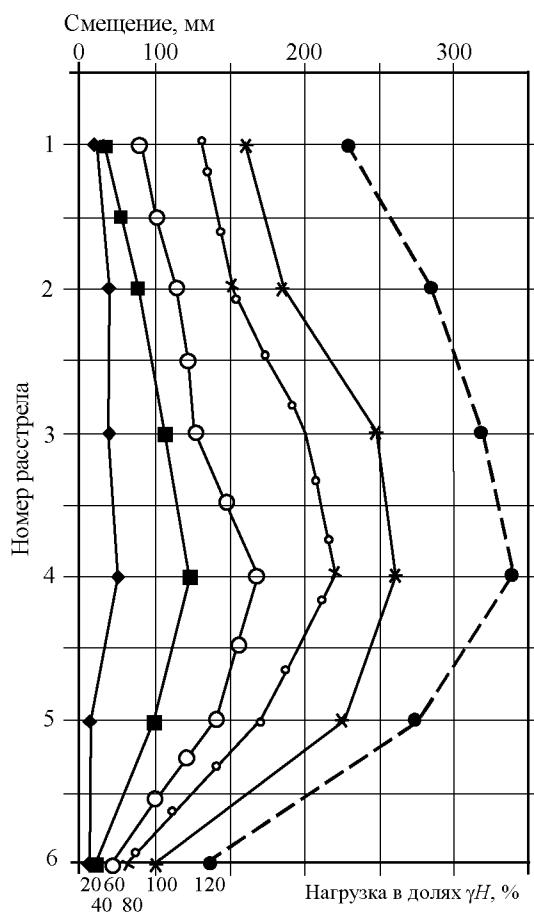


Рис.5. Горизонтальные смещения лба забоя, удерживаемым классическим способом крепления кровли, лба забоя и выработки, закрепленного опережающей крепью

ботки в случае применения опережающей крепи и при традиционном креплении, а на рис.5 представлены, соответственно, графики смещения расстрелов по оси выработки. Все величины смещений на графиках приведены в пересчете на натуре.

По результатам исследований установлено:

1. Деформации колец постоянной обделки остаются практически равными при любой схеме крепления забоя на каждой стадии загружения.

2. Смещение кровли в забое выработки, закрепленной опережающей крепью забоя (модель № 2), на всех стадиях нагружения примерно вдвое меньше осадок, зафиксированных в модели с традиционной схемой крепления (модель № 1).

3. При нагрузке 100 % γH смещение кровли выработки в модели № 2 составили 31 мм, в модели № 1 – 68 мм. При увеличении нагрузки до 1,2 γH в модели № 1 (без опережающей крепи) кровля забоя потеряла устойчивость в связи с возникновением «з-

кола» в горизонтальной плоскости в верхней и средней частях забоя, тогда как кровля в модели № 2 (с опережающей крепью) соста-вила всего 40 мм.

4. Зона распространения осадок кровли протерозойских глин от плоскости забоя в модели № 2 – 6,5-7,0 м, в модели № 1 – 15-16 м.

Результаты исследований, проведенных на моделях из эквивалентных материалов, позволили разработать научно обоснован-ные рекомендации внедрения новой техно-логии крепления лба забоя при строительст-ве среднего зала станции «Спасская».

Приведенные примеры исследований иллюстрируют широкие возможности физи-ческого моделирования методом эквивален-тых материалов как сложных конструкций подземных сооружений, так и технологий их сооружений. Физическое моделирование позволяет получить достоверные результаты НДС массива и обделки, которые часто не-возможно получить математическим моде-лированием.