

зис докембрийских железисто-кремнистых и марганцевых формаций мира».- Киев: Наукова думка.- 1972.- С. 44-55.

3. Виноградов А.П. Газовый режим Земли// Химия земной коры. – Т.2. – М.: Наука, 1964. – с. 12-22.

4. Железисто-кремнистые формации докембрия Европейской части СССР. Зеленокаменные пояса и роль вулканизма в формировании месторождений/ Е.М. Лазько, А.А. Сиворонов, М.А. Ярошук и др. - Киев: Наук. думка, 1990.- 172 с.

5. Лазько Е.М. Архейские железорудные формации и некоторые особенности их генезиса // Геология рудных месторождений. – 1988. - №2. – С. 9-10.

6. Мельник Ю.П. Физико-химические условия образования докембрийских железистых кварцитов.- Киев: Наук. Думка, 1973.- 287 с.

7. Хаин В.Е. Особенности тектонического развития земной коры в раннем докембрии – действительные и мнимые // Проблемы геологии раннего докембрия. – Л.: Наука, 1977. – С. 5-12.

8. Goodwin A. M. Distribution and origin of Precambrian banded iron-formation. – Rev. Brasil. Geocienc., 1982, v. 12, №1-3, p. 475-462.

**УДК 624.191.24**

**В.Д. Петренко, А.Л. Тютюкин**

## **ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ РАСЧЕТ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА С ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ ОКРУЖАЮЩЕГО МАССИВА КАК УПРУГО-ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКОГО**

У статті розглядається проблема просторових розрахунків станцій метрополітену з інтерпретацією навколишнього масиву як пружно-в'язко-пластичного. Наведено алгоритм розрахунку пілонної станції, особливістю якого є облік пружних, пластичних і в'язких (реологічних) властивостей масиву. Показано, що при використанні розробленої методики досягається високий рівень адекватності моделі реальним умовам.

## **SPATIAL ACCOUNTS OF UNDERGROUND STATIONS WITH INTERPRETATION OF AN ENVIRONMENTAL MASSIF AS ELASTIC, VISCOUS AND PLASTIC**

In the article is considered the problem of spatial accounts of underground stations with interpretation of an environmental massif as elastic, viscous and plastic. The algorithm of account pylon station is given, which distinctive feature is the account elastic, plastic and viscous (reological) of massif properties. Is shown, that at use of the developed technique the high level of adequacy to model to real conditions is reached.

Ряд исследований, проведенных в 90-х годах прошлого века и ведущихся сейчас, убедительно доказал несостоятельность применения плоских расчетных схем для расчета трехсводчатых станций метрополитена глубокого заложения типа пилонная или колонная [1-4]. Расчеты, основанные на разделении цельной пространственной станционной конструкции на ряд плоских схем (в проемной части, в пилонной части и перемычке), дают искаженное представление о напряженно-деформированном состоянии конструктивных элементов станции, так как не учитываются два важнейших фактора работы обделки станции метрополитена [4]. Первый фактор – пространственность работы обделки, которая кардинально меняет картину силовых факторов в элементах конструкции по сравнению с той же картиной в плоских расчетных схемах. Второй фактор – неразрывность работы всех конструктивных элементов станции, которая теряется при разделении конструкции на части и не может быть восполнена

формальным переносом усилий с одной части на другую, ибо не выполняется принцип взаимовлияния деформаций элементов.

Несомненно, такой подход к расчету пилонных и колонных станций был вынужденным и логично отражал отсутствие методик расчета и оптимизации пространственных стационарных конструкций. В какой-то мере такое положение понятно, так как расчет пилонной (колонной) станции как конструкции с элементами разной метрики (пластины, оболочки, сплошные тела), усложненной различного типа нерегулярностями (дискретное изменение жесткостей, вырезы в цилиндрической оболочке бокового тоннеля – проходы и т.д.) и неравномерной изменяющейся нагрузкой, чрезвычайно сложен. Конечно же, для решения такой задачи были необходимы упрощающие допущения, которые смогли бы сделать это решение возможным [5, 6]. Но накопление допущений в приложении к расчетной схеме пилонной (колонной) станции приводит к искажению реальной картины статической работы конструкции и, соответственно, к неверному определению силовых факторов, к неадекватному проектированию, к перерасходу материалов, к финансовым потерям.

Решение проблемы пространственного расчета станции возможно применением численного метода строительной механики – метода конечных элементов (МКЭ), реализуемого в виде профессиональных расчетных комплексов (ANSYS, PLAXIS, SCAD и др.), что позволяет убрать из творческого расчетного процесса рутинность ручного ввода информации, используя высокий уровень визуализации модели, применяя 3D-моделирование, креацию модели из типовых элементов и т.д.

Но при достижении некоторых успехов в области пространственных расчетов, перед исследователями подземных сооружений встают проблемы иного порядка, а именно – необходимость моделирования окружающего крепь массива, который адекватно отражал бы свойства реального массива [7]. Так как эта область исследована недостаточно, авторами предложена новая концепция моделирования окружающего массива в пространственных расчетах с помощью МКЭ, основанная на фундаментальных положениях строительной механики и теории упругости.

Прежде всего, оговорим тот факт, что распределение некоторых характеристик системы «крепь-массив» неоднородно, неравномерно и может изменяться во времени. Таким образом, предлагается интерпретация окружающего массива как упруго-вязко-пластического, т.е. среды, изменяющей свои свойства под нагрузкой (упруго-пластическая составляющая) и во времени (упруго-вязкая и вязко-пластическая составляющие), железобетонная крепь также представляет собой сложную среду. Следовательно, одновременный учет пространственного взаимодействия двух сложных сред (массива и крепи) представляется на данном этапе исследований проблемным. Поэтому понятен выбор среды, свойства которой будут учитываться – грунтовый окружающий массив. Сложность применения интерпретации массива как собственно упруго-вязко-пластического состоит в том, что учет всех трех компонент одновременно слишком сложен. Поэтому произведем разделение упруго-вязко-пластичной модели массива на две: упругопластическую и вязкоупругую. Применение этих двух моделей ок-

ружающего массива реализуется нами в пространственном расчете пилонной станции методом конечных элементов с применением расчетно-вычислительного комплекса ANSYS.

Для моделирования грунтового массива как системы с изменяющимися параметрами нами предлагается использование принципа дискретных состояний. Под этим термином понимается замена динамического процесса изменения свойств массива и крепи квазистатическим процессом, который характеризуется набором состояний, определяющих систему в определенный момент времени. Такая задача правомерна в том случае, когда скорость изменений свойств системы «крепь-массив» невелика – непрерывный процесс возможно заменить дискретным. Особо стоит выделить допущение, которое реализуется в рамках этого принципа: при изменении напряженно-деформированного состояния за счет строительных процессов (постановка крепи, нагнетание и т.д.) происходит смена модели взаимодействия системы «крепь-массив», обусловленная изменением соотношения трех компонент – упругой, пластической и вязкой. Таким образом, можно сказать, что выбор модели взаимодействия системы «крепь-массив» зависит от доли участия в формировании напряженно-деформированного состояния двух из трех компонент, причем участием третьей компоненты можно пренебречь.

Выбор упругопластической и вязкоупругой моделей взаимодействия крепи с массивом не случаен и обусловлен наиболее широко встречающимися инженерно-геологическими условиями строительства пилонных станций, представленных тугопластичными или твердыми спондиловыми или кембрийскими глинами. Несомненно, для практических расчетов требуется определение границ применения этих двух моделей и в зависимости от них производится реализация допущения, приведенного выше.

Известно, что до установки временной или постоянной крепи, в окружающем массиве, представленном глинами, проявляются явления ползучести [7-8]. Изменение напряженного состояния, увеличение деформаций наблюдается в течение 14 дней (для спондиловых глин), после чего ползучесть может считаться установившейся [9]. Таким образом, в случае незакрепленной выработки или выработки с податливым временным креплением, явления ползучести превалируют над явлениями упругости и пластичности. При этом мгновенные деформации являются упругими и не зависят от времени, а затем начинается процесс развития деформации ползучести, что обуславливает моделирование вязкоупругой моделью взаимодействия системы «крепь-массив».

После установки крепи деформации ползучести уменьшаются, но их роль в формировании НДС продолжает быть важной. При деформировании постоянной крепи достаточной жесткости основную роль в деформировании также начинают играть упругие деформации. Следует помнить, что при достижении напряжениями некоторого предела в некоторых зонах массива также образуются и пластические деформации, участвующие в процессе деформирования. Таким образом, для этого случая, когда роль упругих и пластических деформаций больше чем вязких, выбирается упругопластическая модель взаимодействия массива с крепью, но с возможностью учета действия реологи-

ческих явлений. Поскольку процесс изменения напряженно-деформированного состояния системы «крепь-массив» непрерывен, нами предлагается для практических целей принимать принцип дискретных состояний, положения которого рассмотрены выше. Несомненно, критерий выбора моделей взаимодействия крепи с массивом не окончателен, требует уточнений, но не противоречит основным логическим положениям построения таких моделей [10].

Попытки решения задач теории упругости методами строительной механики существуют и успешно себя зарекомендовали. Некоторыми авторами выполнены расчеты – упругопластические [11, 12] и вязкоупругие [13]. Главным недостатком этих разработок является плоская постановка задачи, которая применима лишь для систем, не усложненных нерегулярностями в виде вырезов. Причем проблема изменения жесткостей в реализации МКЭ для этих задач не имеет трудностей.

При постановке и решении пространственных задач неэффективно применение пластинчатых элементов для моделирования массива, а применение объемных элементов не имеет апробированной методики изменения свойств массива. Напряженное состояние таких моделей трудно интерпретируется, решения систем с таким типом элементов требует больших затрат машинного времени даже при условии использования современных ЭВМ (в конкретном случае расчет станции пилонного типа с окружающим массивом при моделировании их объемными элементами (гексаэдры, тетраэдры) только для получения упругого решения занял 11 часов 30 минут с реализацией решения на Pentium3, RAM – 128 Мб). Поэтому выбрана пространственная схема пилонной станции, в которой пилон моделируется стержнями, боковые и станционный тоннели – пластинами, окружающий массив – специальными «грунтовыми» стержнями, которые приложены в узлах пластин. В данном случае приходится исключать моделирование пилона объемными элементами из-за отсутствия какой-либо информации о сходимости моделей с конечными элементами (КЭ) различной метрики, т.е. плоских и пространственных. Но замена пилона системой стержней, которым придается жесткость, эквивалентная жесткости пилона, по мнению авторов правомерна и кардинально не влияет на точность решения.

Прежде чем перейти к сущности и алгоритму расчетов на основе упругопластической и вязкоупругой моделей взаимодействия системы «крепь-массив», стоит обратить внимание на применение в расчетах данных, полученных непосредственно натурными и лабораторными исследованиями свойств пород. Расчеты, проводимые с использованием характеристик, взятых из многочисленных таблиц, данных исследований с подобными инженерно-геологическими условиями и т.д., должны иметь статус предварительных. Использование эффективных методик исследований характеристик окружающего массива и крепи позволяет создать систему двухсторонней телеметрии [14]. Под этим термином подразумевается влияние не только натурных данных на расчеты, но и корректировка напряженно-деформированного состояния (НДС) массива и крепи путем его исследований и выработки рекомендаций относительно каждого отдельного случая. Постоянный телеметрический обмен информацией

позволит получить обоюдную выгоду: в области эксплуатации – внедрение новых технологий управления горным массивом, в области расчетов и теории горного давления – корректировку и апробацию теоретических знаний на практике.

Принцип дискретных состояний разбивает процесс вязкоупругого деформирования массива и крепи на два состояния: состояние упругой деформации, которая длится короткое время (мгновенная упругая деформация) и состояние ползучей деформации. Второе состояние, зависящее от времени, возможно разбить на ряд подсостояний, отделенных друг от друга некоторым интервалом времени. Горное давление на крепь также представляется формирующимся во времени и определяется выражением [9]:

$$Q_t = Q_0 \cdot [1 - \exp(-\frac{t}{T})], \quad (1)$$

где  $Q_0$  – величина давления при статическом равновесии;  $t$  – время, отсчитываемое от момента устройства выработки до включения крепи в работу;  $T$  – время релаксации напряжений в среде вследствие упругого последействия.

$Q_0$  определяется из выражения:

$$Q_0 = 0,354 \cdot \gamma \cdot L^2, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – объемный вес грунта;  $L$  – расчетный пролет разгружающего свода.

Возможно применение теории наследственной ползучести Больцмана-Вольтерра-Работнова [7]. Сущность теории – замена упругих характеристик упругими временными операторами (переменные модули). Для ядра Абеля переменные модули имеют вид [13]:

модуль упругости

$$E_t = \frac{E}{1 + \Phi_t}, \quad (3)$$

коэффициент Пуассона

$$\mu_t = 0,5 - \frac{0,5 - \mu}{1 + \Phi_t}, \quad (4)$$

$$\Phi_t = \frac{\delta \cdot t^{1-\alpha}}{1 - \alpha} \quad (5)$$

$E$ ,  $\mu$  – упругие модули;  $E_t$ ,  $\mu_t$  – переменные модули;  $\alpha, \delta$  – параметры ползучести;  $t$  – время;  $\Phi_t$  – упругий оператор.

Таким образом, на основе предложенной методики возможно определение параметров упругих модулей для любого подсостояния деформации ползучести, характеризующегося временем  $t$ . На рис. 1. показана часть расчетной схемы стационарной конструкции (боковой тоннель).

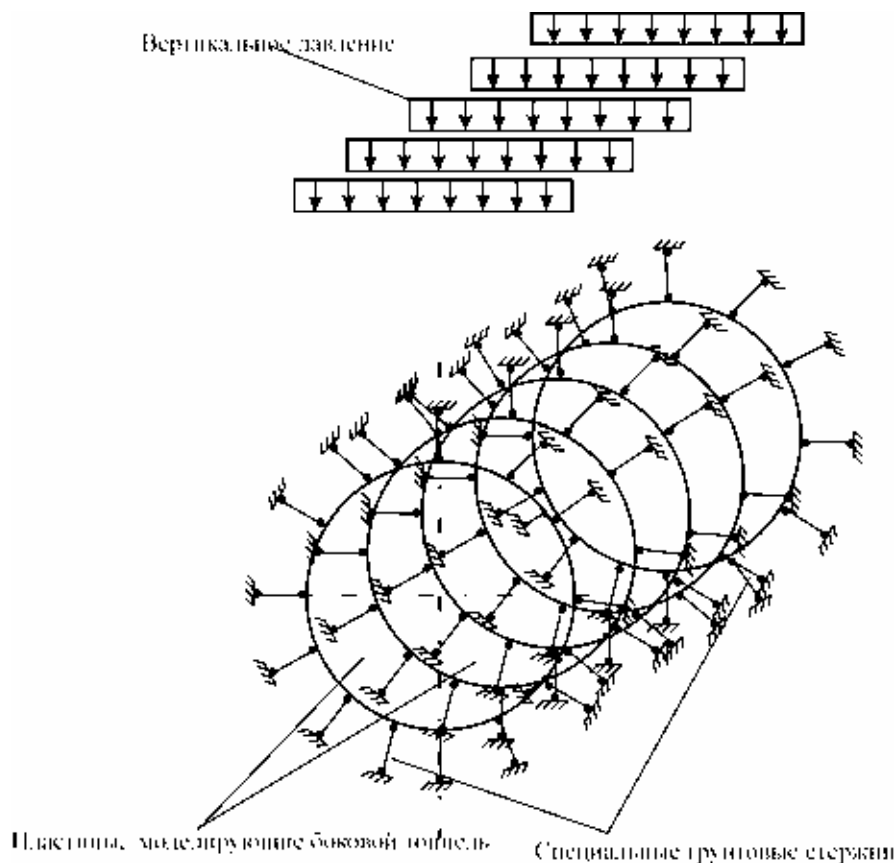


Рис. 1. - Пространственная расчетная схема бокового тоннеля

Приведем алгоритм пространственного расчета бокового тоннеля с моделированием массива как вязкоупругого (с возможностью образования зон пластического деформирования) при следующих условиях.

1. Модель нагружена  $Q_0$ . При этом КЭ грунта придаются значения  $E$  и  $\mu$ . КЭ крепи –  $E_k$  и  $\mu_k$ . Производится расчет напряжений и деформаций в массиве и крепи.

2. Время  $t - n$  часов. Модель нагружена  $Q_t$ . КЭ грунта придаются значения переменных модулей, соответствующих  $t=n$  часов –  $E_t$  и  $\mu_t$ . КЭ крепи –  $E_k$  и  $\mu_k$ . Производится расчет напряжений и деформаций в массиве и крепи.

3. Время  $t - k$  часов. Процедура повторяется – шаг 2.

Причем, первый шаг алгоритма – мгновенное упругое решение, соответствующее первому дискретному состоянию. Второй шаг алгоритма – решение с учетом ползучести, соответствующее подсостоянию 1 второго дискретного состояния. Шаг 3 и последующие шаги – решения, соответствующие

подсостояниям второго дискретного состояния, разделенных определенными интервалами времени.

На втором этапе принимается, что вязкоупругая модель переходит в упруго-пластическую (с возможностью учета реологических явлений) после установки постоянной крепи, в результате чего деформации ползучести уменьшаются. На рис. 2. показана повторяющаяся часть станции, так называемый модуль (пилонная часть – проемная часть – пилонная часть). Ниже приведен алгоритм упругопластического расчета станции.

1. Модель загружена полной сформировавшейся нагрузкой. КЭ грунта при даются значения  $E$  и  $\mu$ , а КЭ крепи –  $E_k$  и  $\mu_k$ . Производится расчет напряжений и деформаций в массиве и крепи.

2. Отыскиваются КЭ, в которых выполняется условие Кулона-Мора (предел текучести):

$$\Phi(\sigma) = \tau_{\max} - \tau_T \leq 0, \quad (6)$$

где  $\tau_{\max}$  – максимальное касательное напряжение в точке тела;  $\tau_T = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + C$  – предел пластичности для породы;  $\sigma_n$  – нормальное напряжение в точке тела;  $\varphi$  – угол внутреннего трения породы;  $C$  – удельное сцепление в породе.

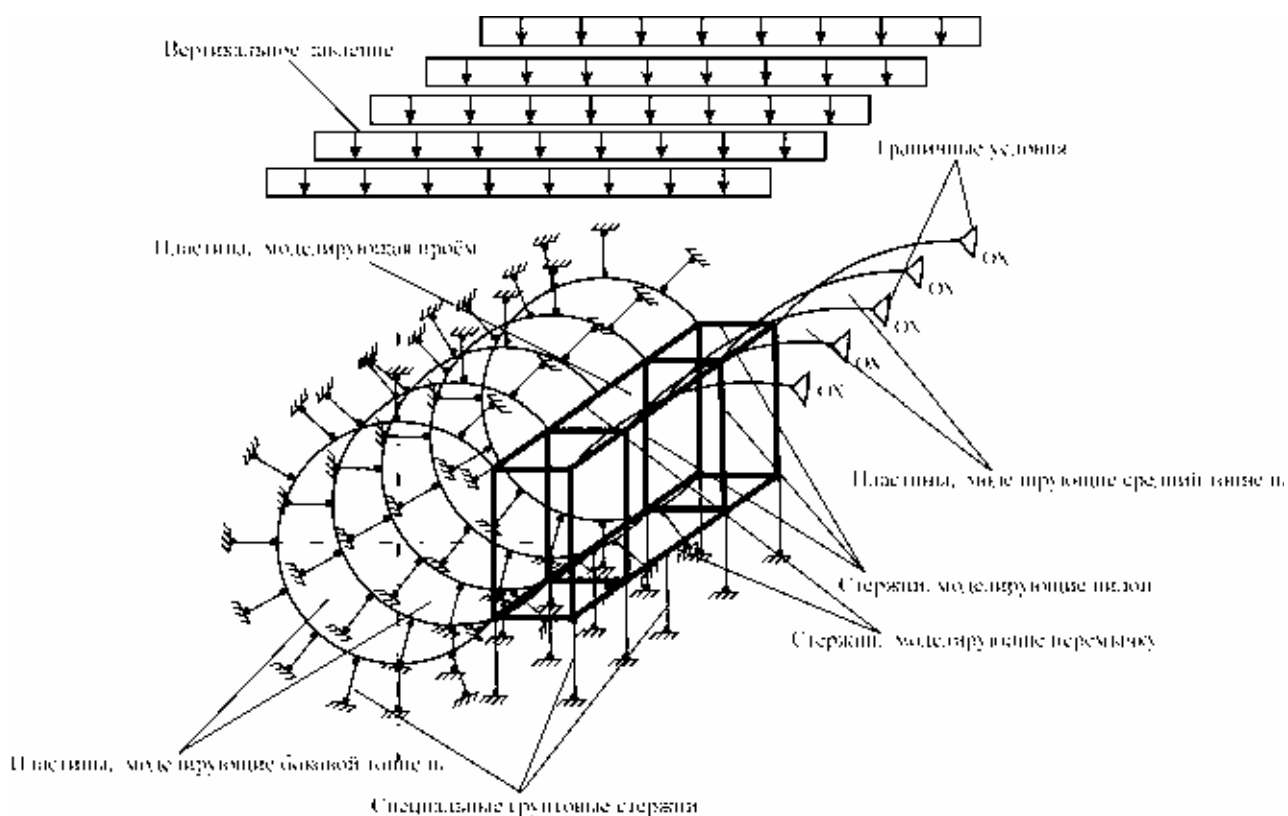


Рис. 2. - Расчетная схема пилонной станции (модуль пилон-проем-пилон)

Примечание. На рис. 1 и 2 не показана треугольная сетка пластинчатых элементов, моделирующая оболочку бокового тоннеля в силу перегруженности рисунков графическими элементами.

Элементы, в которых выполняется условие (6) подвержены пластическому течению. Условие (6) в области растягивающих напряжений имеет иной вид [11]:

$$\sigma_{\min} = -\sigma'_t \quad (7)$$

где  $\sigma_{\min}$  – минимальное главное напряжение;  $\sigma'_t$  – прочность на растяжение, принимаемая  $C/5$ ;  $C$  – удельное сцепление в породе.

После возникновения разрыва в КЭ грунта (условие (7) выполняется), конечный элемент исключается из схемы.

3. Модель загружена полной сформировавшейся нагрузкой. КЭ грунта при даются измененные значения –  $E_T$  и  $\mu_T$ , соответствующие полученным напряжениям. КЭ крепи при даются значения  $E_k$  и  $\mu_k$ . Производится расчет напряжений и деформаций в массиве и крепи.

4. Процедура шага 2-3 повторяется.

Под шагом 1 алгоритма подразумевается упругое решение, соответствующее первому дискретному состоянию – упругому; под шагом 3 подразумевается упругопластическое решение, соответствующее второму дискретному состоянию – упругопластическому, когда в массиве образуются зоны пластических деформаций, отвечающие условию (6), и зоны разрывов, отвечающие условию (7).

Для нахождения измененных под действием нагрузки  $E_T$  и  $\mu_T$ , воспользуемся одним из итерационных методов решения нелинейных задач – методом упругих решений. Сущность его состоит в том, что вместо одной нелинейной задачи решается ряд линейных с изменяющимися входными параметрами [15]. В приложении к нашему случаю требуется решение ряда упругих задач с изменяющимися  $E$  и  $\mu$ , которые берутся из графиков лабораторных испытаний грунтов, например стабилметрических.

В условиях расчета МКЭ возможно провести важный методологический прием, а именно – совмещение работы двух моделей. Вначале расчет незакрепленной выработки или с податливой временной крепью ведется с применением вязкоупругой модели взаимодействия крепи с массивом, а после постановки крепи – упругопластической. Причем, в шаг 1 упругопластического расчета подставляются не  $E$  и  $\mu$ , а  $E_t$  и  $\mu_t$  из вязкоупругого расчета при  $t$ , равном времени от начала разработки сечения до установки постоянной крепи. В то же время и полная сформировавшаяся нагрузка из шага 1 упругопластического расчета может быть скорректирована с учетом времени по формуле (1). Таким образом, сохранится течение процесса деформации, пусть рассмотренного в виде дискретных состояний.

Выполненные нами аналитические построения относятся к специфической области расчетов станций глубокого заложения пилонного или колонного типов в связных грунтах, например, в спондиловых глинах при строительстве Киевского метрополитена. Итак, пространственный расчет пилонной станции с



интерпретацией окружающего массива как упруго-вязко-пластического может расцениваться как еще одно приближение к пониманию работы сложных подземных сооружений. Несомненно то, что применение фундаментальных положений строительной механики, теории упругости, механики подземных сооружений дает возможность построить модель, более точно отражающую свойства системы «крепь-массив». Предложенный авторами подход к механическим моделям взаимодействия крепи с массивом использует эти положения, но не претендует на окончательную истину, требуя конструктивной критики, дополнений и корректировок. Применяя достижения в области исследований нагрузок и взаимодействий, возможно достичь успехов в расчетах станций метрополитена глубокого заложения, тем самым обеспечивая безопасность эксплуатации подземных сооружений при уменьшении расхода материалов и финансовых потерь.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные методы прочностных расчетов в метро- и тоннелестроении // Демешко Е.А., Косицын С.Б., Сергеев В.К., Долотказин Д.Б., Косицын А.С., Потапова О.А. / Сб. трудов науч.-техн. конф. «Подземное строительство России на рубеже XXI века», Москва, 15-16 марта 2000. – М.: ТАР, 2000. – С. 200-207.
2. Дмитриев М.Г. Некоторые вопросы пространственного расчета станций метрополитена глубокого заложения. / В кн.: «Сб. тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та транспортного строительства», вып. 25, 1968. – С. 6-14.
3. Демешко Е.А., Косицын С.Б., Слемзин А.Е. Расчет колонной станции метрополитена как пространственной конструкции. «Транспортное строительство», 1992, № 1. – С. 32-35.
4. Тютюкин А.Л. Анализ пространственной и плоских расчетных схем станции пилонного типа метрополитена глубокого заложения / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2001. – Вип. 2/2001 (11). – С. 337-340.
5. Баклашов И.В., Тимофеев О.В. Конструкции и расчет крепей и обделок. – М.: Недра, 1979. – 263 с.
6. Лиманов Ю.А. Метрополитены. Изд. второе, исправленное и дополненное. – М.: Транспорт, 1971. – 359с.
7. Розовский М.И. Изучение напряженного состояния вокруг горизонтальных выработок с учетом последствия в горных породах. – Изв. АН СССР. ОТН, 1958. - №12. – I. – С. 7-12.
8. Глушко В.Т., Виноградов В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. – М.: Недра, 1982. – 193 с.
9. Заворицкий В.И. Проектирование подземных транспортных сооружений. – Киев: Будівельник, 1975. – 204 с.
10. Булычев Н.С., Амусин Б.З., Оловянный А.Г. Расчет крепи капитальных выработок. – М.: Недра, 1974. – 320 с.
11. Юркевич П. Геомеханические модели в современном строительстве. «Подземное пространство мира», № 1-2, 1996. – С. 10-31.
12. Проценко А.М., Савранский Б.В. Упруго-пластический расчет анкерной крепи. «Транспортное строительство», 1989, № 8. – С. 18-20.
13. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М.: Недра, 1975. – 144 с.
14. Петренко В.Д., Тютюкин А.Л., Цепак С.В. Двухсторонняя телеметрия как процесс прогнозирования и изменения напряженно-деформированного состояния системы «крепь-массив» / Мат. V Всеукр. наук.-практ. конф. «Наука і освіта'2002», Дніпропетровськ-Донецьк, 5-7 березня 2002 р. – Том. 19. Технічні науки. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2002. – С. 34-35.
15. Подземные гидротехнические сооружения. Учеб. для вузов. / Мостков В.М., Орлов В.А., Степанов П.Д., Хечинов Ю.Е., Юфин С.А. Под ред. В.М. Мосткова. – М.: Высшая школа, 1986. – 464