

МПС СССР  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
имени М. И. КАЛИНИНА

*На правах рукописи*

ГОРЛЕНКО Анатолий Иванович

УДК 624.191

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК  
ИЗ МОНОЛИТНО ПРЕССОВАННОГО БЕТОНА  
С УПРУГО-НАСЛЕДСТВЕННЫМ МАССИВОМ  
ПОРОД**

05.23.15 МОСТЫ, ТОННЕЛИ И ДРУГИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ  
СООРУЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНЫХ И АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК 1986

**НТБ  
ДНУЖТ**

Работа выполнена на кафедре строительных конструкций и мостов Киевского автомобильно-дорожного института имени 60 -летия Великой Октябрьской социалистической революции.

Научный руководитель – кандидат технических наук,  
доцент Д.Н.Айвазов.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,  
профессор В.Т.Глушко.  
– кандидат технических наук  
Л.С.Афендииков.

Ведущая организация – ГПИ Метрогипротранс.

Защита состоится "20" ~~сентября~~ 1986 г. в "15" часов на заседании специализированного совета К II4.07.02 "Мосты, тоннели и другие строительные сооружения на железных и автомобильных дорогах" по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта имени М.И.Калинина по адресу: 320629, ГСП, г.Днепропетровск-10, ул. Академика В.А.Лазаряна, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "17" ~~сентября~~ 1986 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
технических наук, доцент



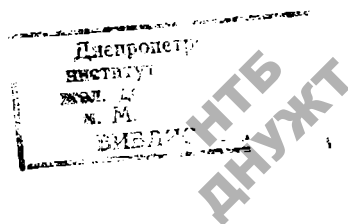
В.П.Тарасенко

НТБ  
ДНУЖТ

Актуальность исследования. Современное тоннеле- и метростро-  
ение развивается в условиях ускоренного научно-технического прог-  
ресса, дальнейшего сокращения материалоемкости тоннельных конст-  
рукций на базе применения новых, прогрессивных типов обделок. К  
ним, в частности, можно отнести обделки из железобетонных блоков,  
обжимаемых в породу, обделки из монолитно пресованного бетона.  
Последний тип обделок позволяет полностью исключить использова-  
ние металла в конструкции, он может быть применен практически  
во всем диапазоне инженерно-геологических условий и глубин за-  
ложения выработки. Вместе с тем, дальнейшее развитие несущих  
конструкций из монолитно пресованного бетона сдерживается не-  
достаточной изученностью поведения массива пород, самой обделки,  
элементов опалубки на различных этапах технологического процес-  
са по проходке выработки и возведения подкрепляющей выработку  
системы.

4897a  
В большинстве методов расчета круговых бетонных обделок не  
в полной мере учитываются реальные свойства материала конструк-  
ции, массива пород, что, чаще всего, приводит к неоправданному  
завышению несущей способности проектируемых подземных сооруже-  
ний, значительному перерасходу строительных материалов, увеличе-  
нию стоимости возводимых объектов. В связи с этим становится оче-  
видной актуальность настоящего исследования - определение более  
близкого к действительности напряженно-деформированного состоя-  
ния систем "массив - твердеющий бетон - опалубка" и "массив -  
обделка" на различных этапах проходки тоннеля.

Целью работы является разработка метода расчета круговой  
обделки из монолитно пресованного бетона, позволяющего учиты-  
вать специфические условия работы обделки с окружающим массивом  
пород, особенности технологии ее возведения, реологические свой-  
ства породы и изменяющиеся деформативно-прочностные свойства



прессованного бетона.

Научная новизна работы:

- предложен новый подход к оценке взаимодействия конструкции из монолитно прессованного бетона с массивом пород, учитывающий технологические особенности сооружения обделок применительно к различным схемам постройки тоннелей, а также стадийность статической работы подкрепляющей выработку системы и массива пород;

- посредством применения принципа Вольтерра к полученному упругому решению выведены расчетные зависимости усилий в обделке и опалубке, напряжений и перемещений возле выработки в тяжелом упруго-наследственном массиве пород с учетом изменения их значений во времени;

- выполнен анализ влияния на напряженное и деформированное состояние обделки и массива ряда исходных параметров и некоторых допущений, позволивший конкретно оценить практическую и научную правомерность принятых допущений.

Достоверность результатов исследования обоснована строгостью исходных предпосылок, применяемых методов и подтверждается сопоставлением полученных решений с результатами некоторых экспериментальных исследований.

Практическая ценность. Предложенный метод расчета позволил обоснованно проектировать конструктивные элементы тоннельной конструкции – обделку и опалубку, а также оптимальные параметры проходческого цикла. Основные результаты работы представлены разработанными алгоритмами расчета прессованных обделок, сооружаемых в породах различной крепости, которые реализованы в виде программы для ЕС ЭВМ. В частности, разработанный алгоритм применим для расчета любых подземных конструкций кругового сечения с непрерывной постоянной жесткостью.

Внедрение результатов. Расчеты обделок из пресбетона, выполненные по предложенному методу, позволили Всесоюзному центральному научно-исследовательскому институту транспортного строительства (ЦНИИС) теоретически обосновать расширение области применения существующих проходческих комплексов по глубинам и группам пород. Применение разработанного алгоритма расчета для работ в устойчивых породах с монолитной бетонной обделкой на линиях Киевского метрополитена имени В.И.Ленина дало возможность оптимизировать конструкции обделок без снижения их надежности. Внедрение результатов исследования в практику подземного строительства позволило получить экономический эффект в сумме 52,5 тыс. рублей.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертации были доложены, обсуждены и одобрены на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности и качества транспортного строительства на БАМе, а также в других районах Сибири и Дальнего Востока" (Москва, 1979 г.), на IУ научно-технической конференции молодых ученых НИИСК (Киев, 1981 г.), на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава Киевского автомобильно-дорожного института в 1978-1985 г.г. На конкурсе работ молодых ученых и специалистов г.Киева, посвященном 1500-летию г.Киева, отмечена II премией (Киев, 1981 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в пяти печатных работах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Работа содержит 215 страниц, из них 197 страниц основного текста, включая ющего 40 таблиц (40 стр.), 58 рисунков (27 стр.), 86 наименования литературы (8 стр.) и 10 страниц приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и народнохозяйственная значимость работы в свете решений партии и правительства по ускорению научно-технического прогресса, характеризуется научная новизна и приводится аннотация диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены вопросы, связанные с опытом внедрения обделок из монолитно пресованного бетона в практику подземного строительства. Отмечается, что значительный вклад в проектирование, создание, совершенствование и освоение механизированных проходческих щитовых комплексов внесли советские инженеры и исследователи – А.М.Гиндин, В.А.Словинский, В.А.Ходош, Л.Д.Вергасов, Б.П.Пачулия, И.Мачавариани и другие.

Вопросам изучения процессов, протекающих в уплотняемых пресованном бетонных смесях, и свойств пресованного бетона посвящены работы А.В.Саталкина, В.В.Михайлова, М.Г.Элбакидзе, И.И.Ахвердова, Л.С.Афондикова, И.Я.Маренного и ряда других авторов.

Анализ существующих технологических схем строительства тоннелей с обделкой из пресованного бетона позволил выделить три характерные разновидности.

1. В неустойчивых породах внедрение ножевой части щита в известной мере опережает разработку породы. Зазор между контуром выработки и оболочкой практически равен нулю. Щит полностью воспринимает развивающееся горное давление и в определенной степени консервирует деформированное состояние контура выработки.

2. Вторая схема реализуется при строительстве подземных сооружений в устойчивых, но достаточно мягких породах. При этой схеме щит при передвижке входит в ранее разработанное пространство так, что между его оболочкой и контуром выработки остается определенный строительный зазор. При этом в большинстве случаев щит

нагружается только горным давлением, развивающимся за счет реологических свойств породы, так как упругие перемещения проходят мгновенно до выборки строительного зазора.

3. В породах скальных и полускальных при бесщитовой проходке или щитовой с применением распорного кольца все упругие перемещения контура выработки и определенная часть реологических как правило реализуются на призабойном участке.

Вторая глава посвящена анализу существующих методов расчета круговых монолитных обделок. Методы расчета несущих конструкций кругового сечения с непрерывной жесткостью можно условно разделить на два основных направления. К первому направлению относятся методы расчета на заданную нагрузку, разработанные Хьвиттом и Иоганессоном, Б.П.Бодровым и Б.Ф.Матэри, Л.И.Гореликом, О.Е.Бугаевой, Н.Л.Бурдзгой, С.С.Давыдовым, М.Шпанглером, Л.М.Емельяновым, И.Л.Баславским и другими авторами. Анализ основных работ позволил выделить их основные особенности:

- реализация любого из упомянутых выше методов возможна только при условии нахождения величины и закона распределения активного горного давления, которое может быть определено либо экспериментально, либо на основании ряда достаточно условных гипотез;

- активное горное давление, прикладываемое в верхней части обделки, практически полностью определяет напряженное состояние только этой части конструкции;

- ни один из методов не учитывает изменение напряженно-деформированного состояния массива пород на этапах создания тоннельных конструкций, технологические особенности возведения обделок, реальные свойства бетона, реологические свойства породы.

Существенный вклад в развитие методов расчета второго направления внесли ученые А.Н.Динник, А.Б.Моргаевский, Д.В.Вайнберг,

И.В.Родин, К.В.Руппенейт, Г.Н.Савин, С.А.Орлов, М.Г.Араманович, Н.С.Булычев, Н.Н.Фотиева, А.Н.Гузь, В.Т.Глушко, Г.А.Крупенников, М.И.Розовский, В.И.Тульчий, Ж.С.Ержанов, Ш.М.Айтиалиев, А.М.Козел, И.А.Баславский и другие. В основу расчета положены решения контактной задачи плоской теории упругости, где обделка рассматривается как механическая связь, накладываемая на контур выработки. Такое представление позволяет определять напряженное и деформированное состояние системы "массив – обделка" под воздействием гравитационного поля. Следует отметить, что методов расчета, разработанных применительно к обделкам из монолитно пресованного бетона, за небольшим исключением (И.А.Баславский) до настоящего времени не предложено.

На основании анализа существующих расчетных схем, применяемых для моделирования массива пород, в качестве расчетной выбрана упруго-вязкая модель массива, которая позволяет учитывать ползучесть горных пород. Линейная теория наследственной ползучести, предложенная Л.Больцманом и развитая В.Вольтерра, дает возможность аналитически описать деформирование горных пород во времени. Необходимо отметить, что решения, полученные на основе этой теории, хорошо согласуются с опытными данными натурных исследований в выработках.

Основные выводы, сделанные во второй главе, определяют направление и выбор методов исследования напряженно-деформированного состояния системы "массив пород – обделка – опалубка".

В третьей главе рассматривается напряженное состояние тяжелого упруго-наследственного массива пород, ослабленного неподкрепленной круговой выработкой. Г.Н.Савин, С.А.Орлов, А.Н.Гузь, В.Т.Глушко, М.И.Розовский, В.Э.Котляревский и ряд других авторов исследуют напряженное и деформированное состояние невесомого масси-

ва пород, ослабленного круговой выработкой, к контуру которой приложены равномерно распределенные напряжения на бесконечности. Полученные решения являются справедливыми только для глубоких выработок, в них не учитывается влияние собственного веса массива, его начальное напряженное состояние.

В работе рассмотрено напряженно-деформированное состояние тяжелого массива пород, ослабленного неподкрепленной выработкой, с учетом предложения И.В.Родина. Тяжелая полуплоскость заменена бесконечной плоскостью с круговым отверстием, с контура которого снимаются напряжения основного напряженного состояния тяжелой плоскости. Наложение решений для основного и дополнительного состояний дает точное выполнение граничных условий как на контуре выработки, так и на бесконечности, а также приближенное на линии земной поверхности, при этом погрешность зависит от относительной глубины заложения выработки. Для вывода расчетных зависимостей использованы основополагающие исследования Н.И.Мусхелишвили. Получены аналитические выражения напряжений и перемещений как в массиве, так и на контуре выработки. Комплексный вектор перемещения контура неподкрепленной выработки представлен зависимостью

$$u_{\theta}^n = u_r - i u_{\theta} = \frac{\gamma_n R_n^2}{8 G_n} \left[ -2(1+\lambda) \frac{H}{R_n} + \frac{1+\lambda}{2} \sigma^{-1} - \frac{2H(1-\lambda)\alpha_n}{R_n} \sigma^2 + \frac{(1+\lambda)\alpha_n}{2} \sigma^3 \right] + A\sigma, \quad (I)$$

где  $R_n$  - радиус выработки,  $H$  - расстояние от линии земной поверхности до центра выработки,  $\lambda = \nu_n / (1 - \nu_n)$  - коэффициент бокового давления,  $\nu_n$  - коэффициент Пуассона породы,  $\alpha_n = 3 - 4\nu_n$  - постоянная Н.И. Мусхелишвили,  $\sigma = e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$ ,  $G_n$  - модуль сдвига породы,  $A$  - вещественная постоянная, характеризующая жесткое смещение массива в целом,  $\gamma_n$  - объемный вес породы.

Выполнены числовые примеры с различными типами пород, а так-

же сделан анализ влияния исходных параметров и некоторых допущений на напряженно-деформированное состояние ослабленного массива. В частности, подтверждена правомерность одного из основных допущений – замены тяжелой полуплоскости тяжелой плоскостью, оказалось, что это допущение справедливо на всем диапазоне глубин заложения выработок, характерных для закрытого способа производства работ.

Для учета реологических свойств породы к полученному решению теории упругости применен принцип Вольтерра. Выполнена замена упругих констант  $\nu_n$  и  $G_n$  соответствующими временными интегральными операторами упругой наследственности

$$\nu_n = \nu_0 [1 + \omega \mathcal{D}_\alpha^* (-\beta)] , \quad G_n = G_0 [1 - \chi_c \mathcal{D}_\alpha^* (-\beta_c)] , \quad (2)$$

$$\varepsilon_n = 3 - 4\nu_0 [1 + \omega \mathcal{D}_\alpha^* (-\beta)] , \quad \lambda = \frac{\nu_0}{1 - \nu_0} \left[ 1 + \frac{\omega}{1 - \nu_0} \mathcal{D}_\alpha^* \left( \frac{\omega \nu_0}{1 - \nu_0} - \beta \right) \right] ,$$

где  $\nu_0$  и  $G_0$  – упруго-мгновенные значения коэффициента Пуассона и модуля сдвига породы,  $\mathcal{D}_\alpha^* (-\beta) = \int_0^t \mathcal{D}_\alpha (-\beta) d\tau$

$$\omega = \frac{1 - 2\nu_0}{2\nu_0} \chi \quad \chi_c = \frac{3\chi}{2(1 + \nu_0)} , \quad \beta_c = \beta + \frac{1 - 2\nu_0}{2(1 - \nu_0)} \chi$$

$\chi$  и  $\beta$  – реологические константы,  $t$  – рассматриваемый момент времени.

В качестве ядра  $\mathcal{D}_\alpha$  временных интегральных операторов принята дробно-экспоненциальная функция Д.Н.Работнова.

Четвертая глава посвящена постановке контактной задачи, исследованию характера взаимодействия контактных напряжений между компонентами системы на различных стадиях ее работы. На основании изучения технологических особенностей сооружения тоннелей с обделкой из пресбетона было установлено, что характерной особенностью этих конструкций является стадийность статической работы при вза-

имодействии с массивом пород. К расчетным стадиям работы монолитно пресованной обделки относятся:

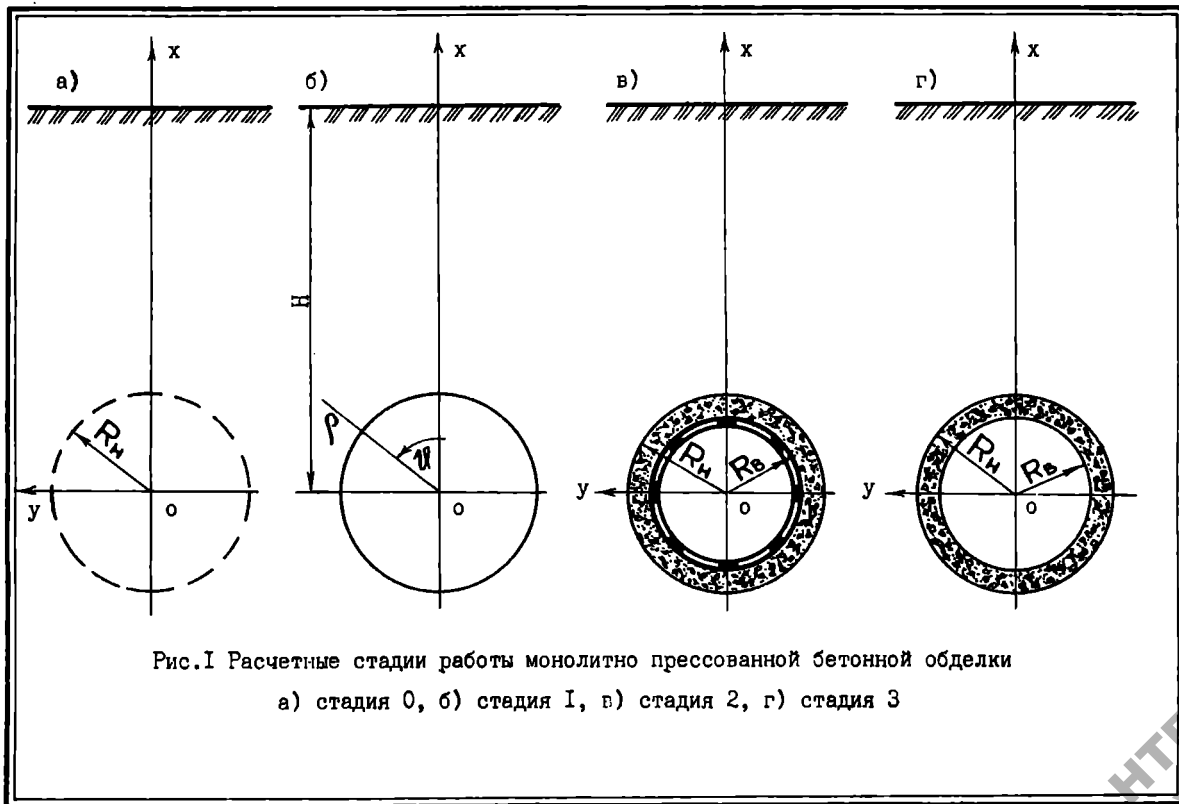
стадия 0 - соответствует напряженно-деформированному состоянию нетронутого массива пород, в котором к моменту раскрытия выработки оно сформировалось под действием как собственного веса, так и в результате тектонических процессов (рис.1а);

стадия I - характеризуется напряженным и деформированным состоянием тяжелого массива пород, ослабленного неподкрепленной выработкой кругового сечения. Напряжения и перемещения точек массива и контура выработки определяются только гравитационной нагрузкой массива (рис.1б);

стадия 2 - является основной и соответствует возведению пресованной обделки. Здесь рассматривается напряженно-деформированное состояние трехкомпонентной системы "массив пород - твердеющий бетон - опалубка". Усилиями пресования вначале нагружается только опалубка. По мере твердения бетона происходит перераспределение напряжений и усилий между компонентами системы (рис.1в);

стадия 3 - соответствует работе двухкомпонентной системы "массив пород - обделка" после снятия опалубки. При этом напряженно-деформированное состояние системы рассматривается в условиях контактного взаимодействия между породой и обделкой (рис.1г).

Независимо от технологии постройки тоннеля расчетная схема обделки и массива представляется в следующем виде: для начального периода контур выработки подкрепляется составным кольцом из двух компонентов - твердеющий бетон обделки и опалубка (рис.2а), а затем после снятия опалубки - однокомпонентным кольцом обделки, подкрепляющим контур выработки (рис.2б). Расчет обделки сводится к решению двух основных контактных задач. Основное граничное условие первой задачи сводится к условию равенства нулю суммарного



комплексного вектора перемещений на контакте между породой и обделкой, на контакте между обделкой и опалубкой, а также равенства нулю внешних напряжений, прикладываемых к внутреннему контуру опалубки

$$\begin{aligned} u_{\text{б}}^{\text{н}} - u_{\text{п}}^{\text{н}} &= u_{\text{г}}^{\text{н}} - \Delta u_{\text{г}}^{\text{н}} && \text{на контуре } L_{\text{н}} \\ u_{\text{б}}^{\text{в}} - u_{\text{он}}^{\text{в}} &= 0 && \text{на контуре } L_{\text{в}} \end{aligned} \quad (3)$$

После снятия опалубки граничные условия (3) существенно упрощаются, остается только условие равенства нулю суммарного комплексного вектора перемещений на контакте между породой и обделкой и условие равенства нулю внешних напряжений, приложенных к обделке изнутри тоннеля

$$\begin{aligned} u_{\text{б}}^{\text{н}} - u_{\text{п}}^{\text{н}} &= u_{\text{г}}^{\text{н}} - \Delta u_{\text{г}}^{\text{н}} && \text{на контуре } L_{\text{н}} \\ q_{\pm\kappa}^{\text{в}} &= 0 && \text{на контуре } L_{\text{в}} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $u_{\text{б}}^{\text{н}}$  – комплексный вектор перемещений наружного контура свободно деформируемого кольца обделки от воздействия контактных напряжений  $q_{\text{п}}^{\text{н}}$  и  $q_{\text{б}}^{\text{в}}$ , приложенных к нему со стороны породы и опалубки,  $u_{\text{п}}^{\text{н}}$  – комплексный вектор перемещений контура выработки от воздействия контактных напряжений  $q_{\text{п}}^{\text{н}}$ , приложенных к нему со стороны обделки,  $u_{\text{он}}^{\text{в}}$  – комплексный вектор перемещений наружной поверхности опалубки от контактных напряжений  $q_{\text{б}}^{\text{в}}$ , воздействующих на нее со стороны обделки,  $u_{\text{г}}^{\text{н}}$  – определено зависимостью (I),  $\Delta u_{\text{г}}^{\text{н}}$  – приращение  $u_{\text{г}}^{\text{н}}$  за время, прошедшее с момента раскрытия выработки до ее подкрепления системой "твердеющий бетон – опалубка".

При определении комплексных векторов перемещений принято, что контактные напряжения между компонентами системы (рис.3) представлены в виде комплексного степенного ряда с неизвестными коэффициентами  $q_{\text{л}}$ , которые заданы разложениями

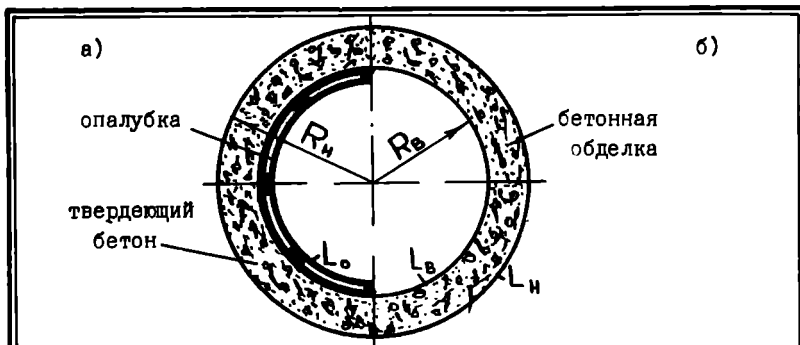


Рис.2 Подкрепление контура выработки

а) трехкомпонентная система, б) двухкомпонентная система

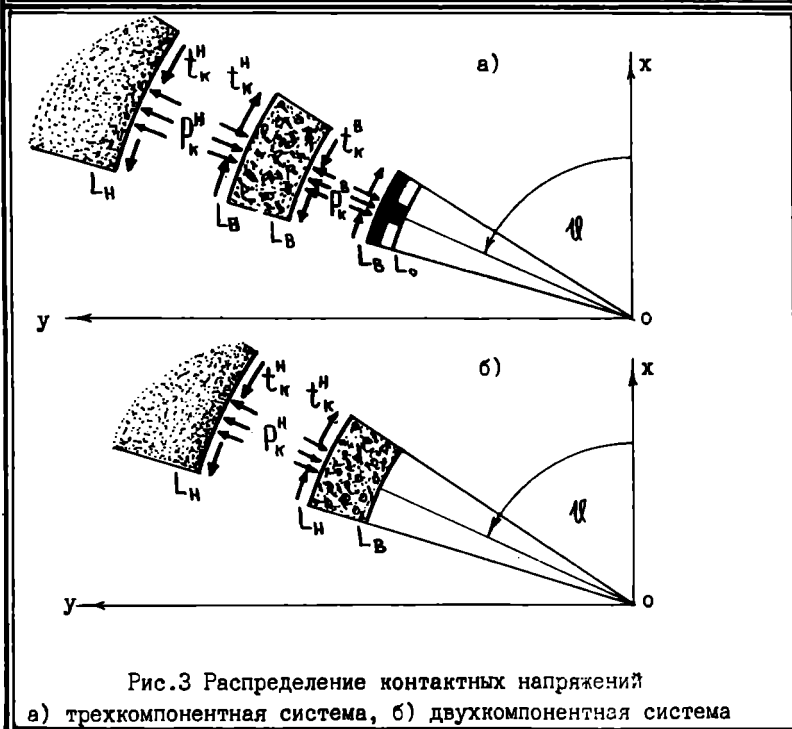


Рис.3 Распределение контактных напряжений

а) трехкомпонентная система, б) двухкомпонентная система

$$q_r = q_{rp} - i q_{ru} = q_{r0} + q_{r1} \sigma + q_{r-1} \sigma^{-1} + \sum_{k=2}^{\infty} (q_{rk} \sigma^k + q_{r-k} \sigma^{-k}), \quad (5)$$

а его компоненты определяются выражениями

$$q_{rp} = \sum_{k=0}^{\infty} p_k \cos k\theta, \quad q_{ru} = \sum_{k=1}^{\infty} t_k \sin k\theta,$$

при этом между  $q_{rk}$ ,  $p_k$  и  $t_k$  существуют зависимости

$$p_0 = q_0, \quad t_0 = 0, \quad q_{\pm k} = \frac{p_k \mp t_k}{2} \quad (6)$$

Путем решения соответствующих граничных задач получены аналитические выражения комплексных векторов перемещений, фигурирующих в основных граничных условиях (3) - (4)

$$u_B^{(B)} = u_r - i u_u = \frac{R_{n(B)}}{2G_B} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(1+\alpha_k) a_{-k} R_{n(B)}^{-k} + q_{r-k}^{(B)}}{1-k} \sigma^k + B \cdot \sigma, \quad (7)$$

когда используется гипотеза плоских сечений,

$$u_B^{(B)} = u_r - i u_u = -\frac{R_{n(B)}^2 (1+n)}{2(EF)_B} (q_{r0}^{(B)} - q_{u0}^{(B)}) - \frac{R_{n(B)}^2}{4(1+n)(EF)_B} (q_{r-1}^{(B)} - n^2 q_{u-1}^{(B)}) \sigma^{-1} - \frac{R_{n(B)}^4 (1+n)}{16(EI)_B} \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(k+1) V_k \sigma^k + (k-1) V_k \sigma^{-k}}{k^2 (k^2 - 1)^2} + C \cdot \sigma, \quad (8)$$

когда используются решения механики стержневых систем,

$$u_n^H = u_r - i u_u = \frac{R_n}{2G_n^*} \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \frac{q_{r-k}^H}{k+1} \sigma^{-k} + \alpha_n \sum_{k=2}^{\infty} \frac{q_{r-k}^H}{k-1} \sigma^k \right] + D \cdot \sigma, \quad (9)$$

$$u_{on}^B = u_r - i u_u = -\frac{R_B^4}{2(EI)_{on}} \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(k-1) Q_{r-k}^B + (k+1) Q_{u-k}^B}{k^2 (k^2 - 1)^2} [(k+1) \sigma^k + (k-1) \sigma^{-k}] + L \cdot \sigma, \quad (10)$$

где  $G_B$  - модуль сдвига бетона,  $n = R_B/R_n$  - отношение внутреннего радиуса обделки к наружному,  $\alpha_{-k} = f(n)$ ,  $V_{k,2} = f(n, q_r^H, q_u^H)$ ,  $(EF)_B$ ,  $(EI)_B$ ,  $(EI)_{on}$  - соответствующие жесткости кольца обделки и опалубки,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $L$  - постоянные интегрирования,  $(B)$  - обозначает внутренний контур. Модуль сдвига породы в момент подкрепления выработки определен зависимостью

$$G_n^* = G_0 \left[ (1 + \Delta) - \chi_c \mathcal{E}_\alpha^* (-\beta_c) \right] \quad (\text{II})$$

где  $\Delta = \chi_c \int_0^{t_0} \mathcal{E}_\alpha(-\beta_c) dz$ ,  $t_0$  - время, соответствующее моменту подкрепления выработки системой "твердеющий бетон - опалубка".

В пятой главе решены контактные задачи для различных стадий сооружения монолитно пресованной бетонной обделки. В основу перечисленных в четвертой главе контактных задач положена математическая теория упругости, базирующаяся на применении функций комплексного переменного. В результате подстановки аналитических выражений комплексных векторов перемещений (I), (7) - (10) в граничные условия (3) - (4) и сравнения коэффициентов, стоящих в виде сомножителя при одинаковых степенях  $\sigma$ , приходим к системам линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $Q$ . Решение полученных систем (второго и четвертого порядка) позволяет однозначно определить коэффициенты  $Q$ , по которым вычисляются контактные напряжения, перемещения обделки и опалубки, усилия в компонентах подкрепляющей системы.

Исследование влияния исходных параметров на развитие напряженно-деформированного состояния системы позволило установить:

- использование в расчетах зависимостей для обделки, основанных на применении гипотезы плоских сечений или методов строительной механики стержневых систем, не дает существенной разницы в окончательных результатах. Вместе с тем формулы второго вида менее сложны, поэтому их применение в расчетах предпочтительнее;

- учет переменного модуля деформации бетона  $E_B$  вносит существенные изменения в значения усилий в обделке;

- усилия в обделке в результате учета реологических свойств породы и переменного модуля  $E_B$  интенсивно развиваются в первые I - 3 месяца с последующим замедлением их роста примерно к I году.

В шестой главе выполнены исследования о характере взаимодействия системы "обделка - опалубка" с упруго-наследственным массивом пород с учетом технологических факторов постройки тоннелей. Разработаны алгоритмы расчета обделок из монолитно пресованного бетона применительно к существующим технологическим схемам проходки выработок. В качестве примера на рис.4 приведены диаграммы развития контактных напряжений  $\sigma_p$  на уровне шельги свода вдоль тоннеля для пресованной обделки, заложённой в песках, уплотнённых глинах и аргиллитах.

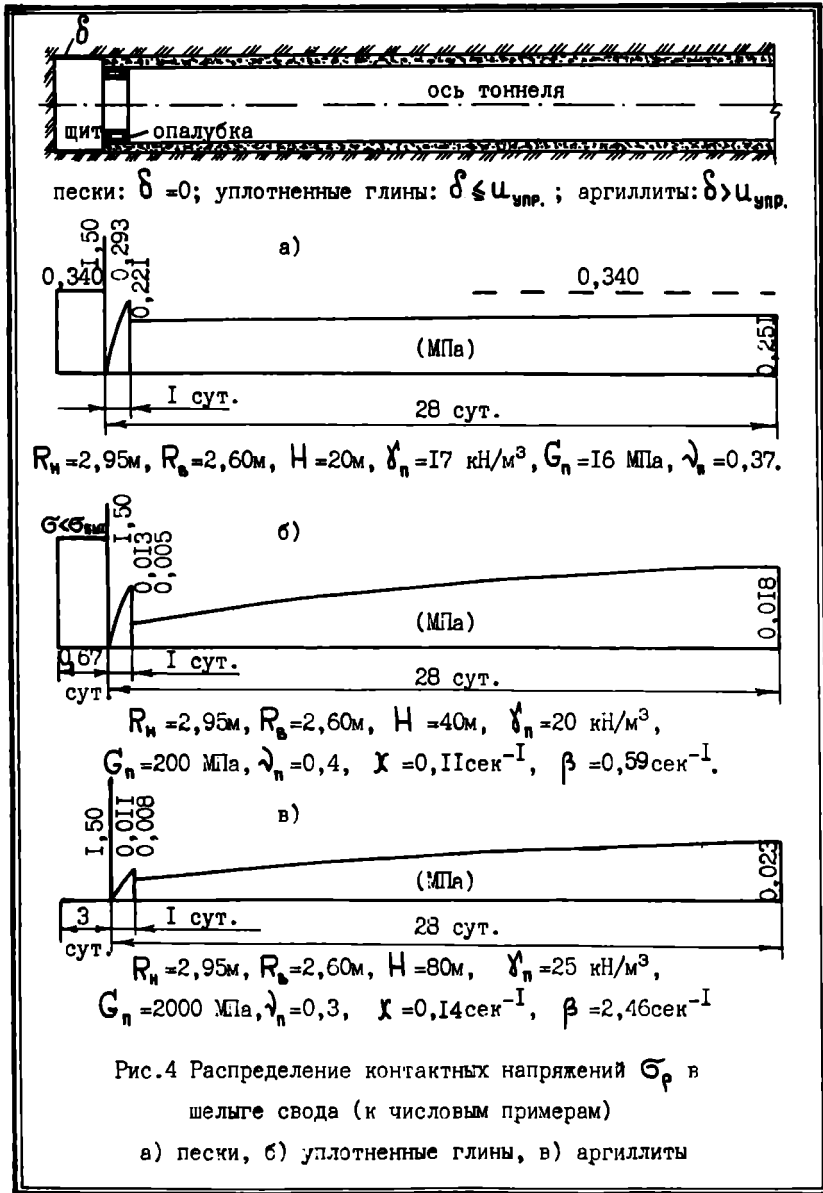
Следует отметить, что задача исследования напряженно-деформированного состояния монолитно пресованной бетонной обделки при совместном влиянии реологии и технологических факторов поставлена впервые. Поэтому выполнено сопоставление с основными существующими методами расчета только в части решения контактной задачи (рис.5). Кроме того выполнено сопоставление результатов исследования с имеющимися экспериментальными данными, которые получили А.Г.Лапшин, Г.Завриева, Т.Канделаки, Б.Завриян. С учетом возможной точности определения контактных напряжений в условиях эксперимента в выработках совпадение результатов можно считать удовлетворительным.

Предложенный метод расчета обделок из монолитно пресованного бетона используется при проектировании ряда тоннельных конструкций из монолитного бетона, железобетонных и чугунных тубингов, имеющих непрерывную постоянную жесткость кольца.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и итоги выполненной диссертации сводятся к следующему.

I. Предложен новый подход к оценке работы обделки из монолитно пресованного бетона, в основу которого положена стадийность



4897a

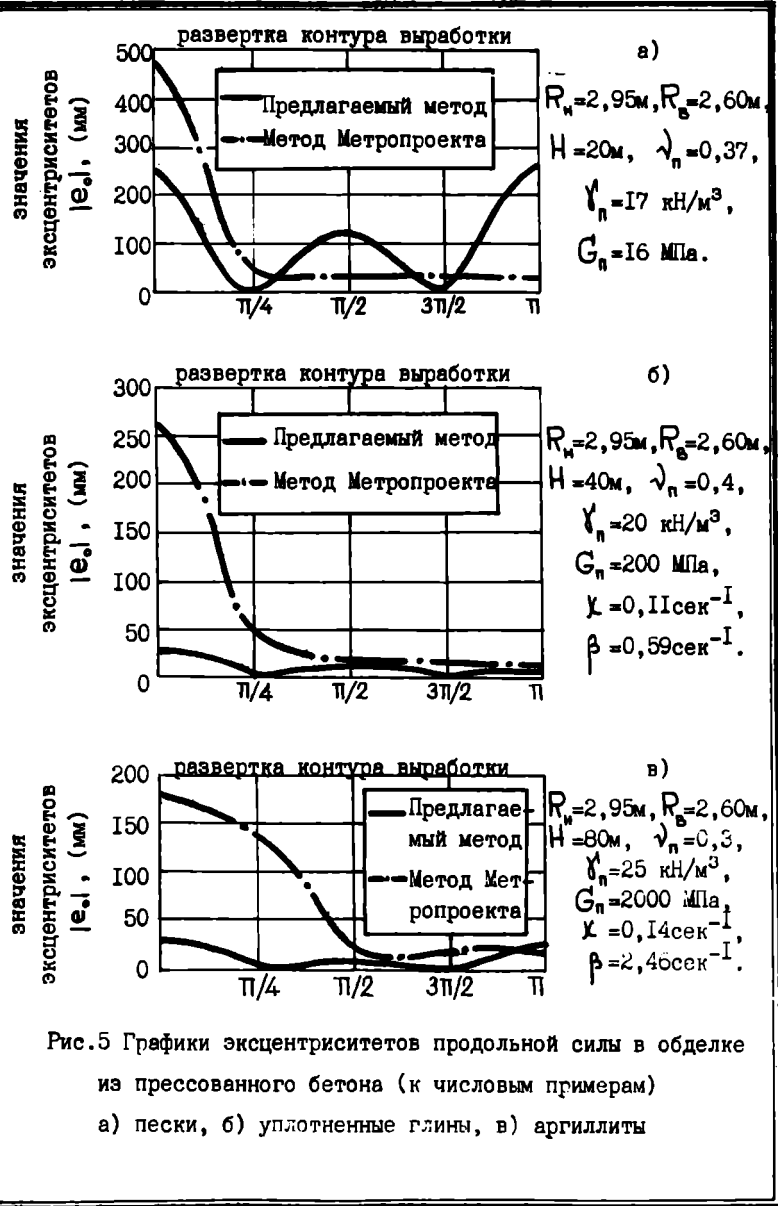


Рис.5 Графики эксцентриситетов продольной силы в обделке из прессованного бетона (к числовым примерам)  
 а) пески, б) уплотненные глины, в) аргиллиты

взаимодействия массива пород и подкрепляющей выработку конструкции. Описано поведение системы "массив пород - обделка - опалубка", сформулированы граничные условия отдельно для каждой стадии строительства обделки.

2. Получены расчетные зависимости напряжений и перемещений тяжелого упруго-наследственного массива пород, ослабленного неподкрепленной выработкой кругового сечения, под воздействием гравитационного поля. Выполнен численный анализ влияния ряда принятых допущений и исходных параметров на развитие напряженно-деформированного состояния массива, и, в частности, установлено:

- замена тяжелой полуплоскости бесконечной плоскостью вполне допустима при глубине заложения выработки более трех ее диаметров, в этом случае погрешность при вычислениях напряжений у линии земной поверхности становится ничтожно малой;

- значение коэффициента Пуассона породы  $\nu_n$ , входящего в константу Н.И.Мусхелишвили  $\alpha_n$ , несущественно влияет на развитие напряжений в массиве и вполне допустимо в практических расчетах пользоваться средним значением  $\nu_n \approx 0,3$ ; в то же время влияние этой константы на развитие перемещений в массиве более существенно, поэтому в расчеты следует вводить значение  $\nu_n$  для конкретного типа породы;

- коэффициент бокового давления  $\lambda$  определяюще влияет на напряженно-деформированное состояние массива вблизи выработки. В расчетные зависимости необходимо вводить значение установившегося коэффициента бокового давления  $\lambda^\infty$ , соответствующее значению  $t = \infty$ .

3. Путем применения принципа Вольтерра к полученному упругому решению осуществлен переход к упруго-вязкой модели породы, выведены расчетные зависимости перемещений, усилий в обделке и опа-

лубие с учетом фактора времени.

4. Численно исследовано напряженно-деформированное состояние трехкомпонентной системы "массив пород – твердеющий бетон – опалубка" на стадии возведения и двухкомпонентной системы "массив пород – обделка" в стадии эксплуатации.

5. Все расчетные зависимости получены в результате решения контактных задач и выведены с учетом реологических свойств породы, изменяющихся деформативно-прочностных свойств монолитно пресованного бетона, что позволяет количественно и качественно оценивать влияние фактора времени на развитие напряженного и деформированного состояния системы.

6. Разработаны и подробно описаны инженерные алгоритмы расчета пресованных обделок, возводимых в различных инженерно-геологических условиях. Выполнены практические расчеты обделок из монолитно пресованного бетона. Полученные результаты сопоставимы с имеющимися экспериментальными исследованиями.

7. Обосновано обобщение предложенного метода расчета на тоннельные конструкции из металла, сборного железобетона и монолитного бетона.

8. Комплексное использование основных научных положений диссертации, разработанные алгоритмы и программа для ЕС ЭВМ, открывают возможность для многовариантного исследования конструкций, для обоснованного решения технологических вопросов проектирования и строительства тоннелей, и в известной мере позволяет оптимизировать как конструкцию обделки, так и технологическую схему производства работ.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Айвазов Ю.Н., Горленко А.И. Расчет обделок из монолитно прессованного бетона с учетом реологии породы и технологических особенностей сооружения тоннеля. -В кн.: Повышение эффективности и качества транспортного строительства на БАМе, а также в других районах Сибири и Дальнего Востока. М., ЦНИИС, 1979, с.139.

2. Айвазов Ю.Н., Горленко А.И. Расчет обделок из монолитно прессованного бетона. -Метрострой, 1979, №7, с.9-11.

3. Горленко А.И. Учет технологических особенностей сооружения тоннелей. -Автомобильный журнал Украины, 1980, №1, с.33-34.

4. Горленко А.И. Розрахунок тунельних оправ із монолітно пресованого бетону. -В кн.: Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Штучні споруди. Київ, Будівельник, 1981, вип.29, с.73-80.

5. Горленко А.И., Белоцкая С.В. Напружено деформований стан важкого масиву порід, послабленого непідкріпленою кільцевою виробкою. -В кн.: Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Штучні споруди. Київ, Будівельник, 1985, вип.37, с.51-56.



БФ 24018. Подпис, к печ. 10.01.86. Формат бумаги 60x84<sup>1</sup>/16. Усл. печ. л. 1,25.  
Уч.-изд. л. 0,9. Заказ 137. Тираж 100 экз.

---

Научно-исследовательский институт строительного производства  
Госстроя УССР, 252180, Киев-180, ул. И. Клименко, 5/2.

---

Фотопечатная лаборатория НИИСП Госстроя УССР,  
252180, Киев-180, ул. И. Клименко, 5/2.