УДК 622.831.3:624.19

**М.О.ЛЕБЕДЕВ**
Факультет освоения подземного пространства, аспирант кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений

# КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК НА ОБДЕЛКУ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

Процесс формирования нагрузки на обделку перегонных тоннелей в общем виде можно представить кривой, в характере развития которой выделяют три составляющие, отражающие влияние забоя и контактные условия обделки с массивом в зависимости от технологии ее возведения.

Величины нагрузок зависят от расстояния от забоя, на котором обделка вступит в контакт с массивом и будет выполняться условие непрерывности перемещений контура тоннеля и обделки. Задача по определению нагрузок на крепь решается из условия совместности деформирования системы обделка – грунтовый массив. Рассматривается упругая модель взаимодействия обделки с массивом по-род по Г.Н.Савину. При взаимодействии обделки с грунтом обделка вступает в работу с массивом не мгновенно, а на некотором расстоянии от забоя. Для приближения расчетных значений нагрузок к фактическим нужно учитывать влияние забоя. Решение задачи взаимодействия сводится к контактной задаче – задаче механики сплошных сред. При этом модуль деформации заменяется приведенным модулем.

Предложенный метод расчета нагрузок на обделки тоннелей программно реализован в среде DELPHI for Windows. Программа позволяет производить графическую двухмерную и объемную интерпретацию расчетных данных и выводить результаты работы программы на принтер.

Tunnel lining load-forming process generally may be represented by the curve with progress of which three components are to be marked out. They characterize the face and tunnel lining contact conditions with massif depending on lining construction technology.

The load values depend on the distance from the face at which lining gets in contact with massif, therefore tunnel and lining contours replacement continuity condition is met. Support loads determination problem is solved only on lining-massif system straining simultaneity principle. The elastic model of lining-massif interaction according to G.N.Savin estimates is considered.

When interacting with soil the lining starts to contact with massif not instantly but at some distance from the face. For the approximation of loads calculated values to real ones the face effect is to be taken into account. The solving of interaction problem comes to a contact problem – the medium mechanics problem. At that the deformation modulus is substituted by reduced modulus.

The offered tunnel lining loads calculation method is realized as DELPHI software for Windows. The program allows to perform two- and three-dimensional graphic interpretations of calculated data and to out-type the program work results.

Расчет нагрузок на крепь капитальных выработок и тоннелей, в том числе для рассматриваемых условий, изучен в ряде работ. Однако обзор натурных исследований по определению давлений на обделки тоннелей показывает, что натурные нагрузки не всегда соответствуют расчетным. Основным недостатком расчетных методик в этом случае является недостаточно точный учет влияния забоя и отсутствие влияния технологии возведения обделки на развитие нагрузок. Поэтому требуется дальнейшее развитие расчетных методик определения нагрузок на обделки тоннелей.

Аналитическая и статистическая обработка данных наблюдений за показаниями датчиков напряжений и деформаций, полученных сотрудниками лаборатории ЦНИИС и непосредственно автором вместе с институтом «Ленметрогипротранс», показала, что процесс формирования нагрузки на обделку перегонных тоннелей в общем виде можно представить кривой на рис.1. Анализ процесса развития нагрузки на обделку позволяет выделить три составляющих: первая (линейный участок до излома) – изменение нагрузки при влиянии забоя; вторая (линейный участок после излома) – изменение нагрузки в условиях перераспределения напряжений в массиве, связанное с контактными условиями обделки и массива; третья (линейный участок после второго излома) – изменение нагрузки, связанное с реологическими характеристиками массива.

Величины нагрузок зависят от расстояния от забоя, на котором обделка вступит в контакт с массивом и будет выполняться условие непрерывности перемещений контура тоннеля и обделки (рис.2). Для разжатой на грунтовый массив обделки это расстояние соответствует месту установки, т.е. $\ell = 6{,}8$ м. Для сборной обделки это расстояние зависит от комплекса факторов: расстояния установки кольца от забоя; расстояния от места установки кольца до места выполнения нагнетания за обделку; времени набора раствором прочности; качества выполнения нагнетания. Для технологических схем возведения сборной (тюбинговой) обделки, применяемых в Санкт-Петербурге, это расстояние составляет 7,5-9,0 м.

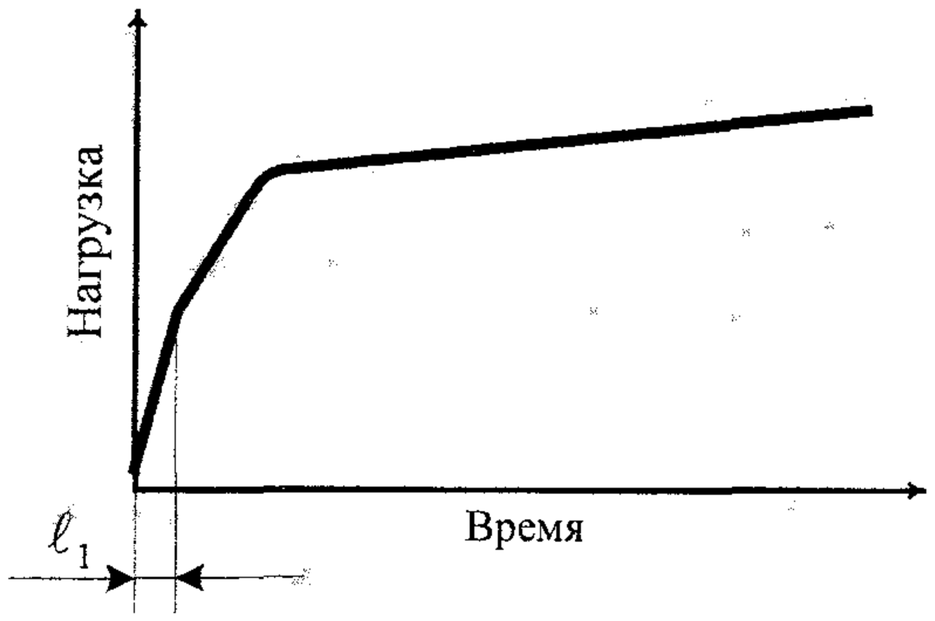



Рис.1. Схема развития нагрузки на обделку

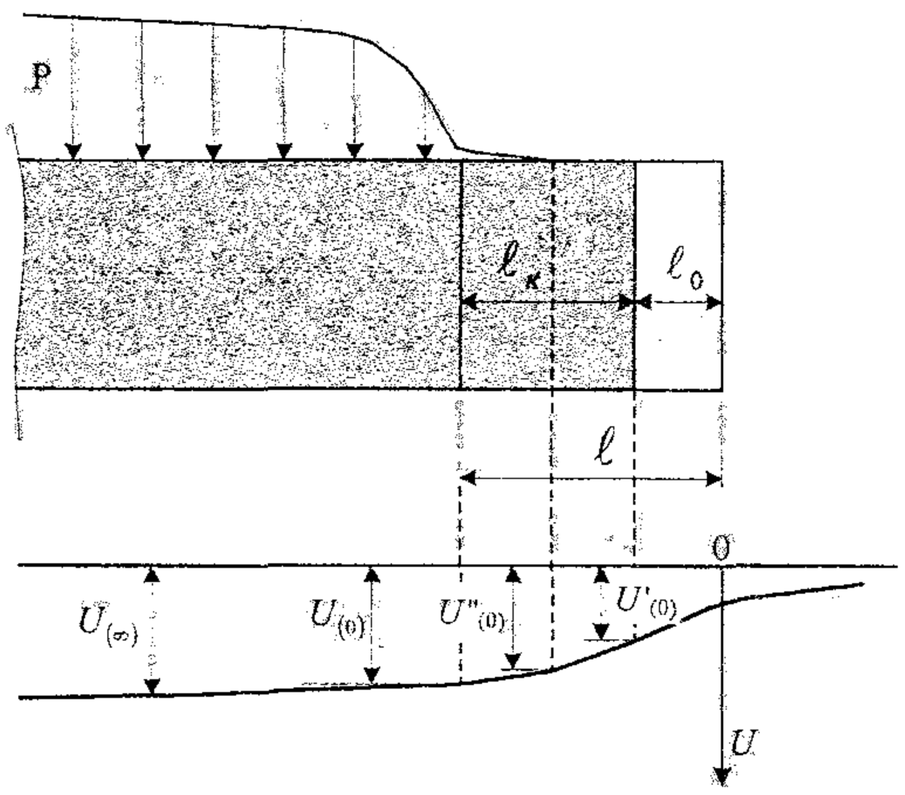



Рис.2. Принципиальная схема механизма формирования нагрузки на обделку и смещения контура тоннеля

Задачу по определению нагрузки на крепь решим из условия совместности деформирования системы крепь – порода (схема взаимодействия).

Впервые условие совместности перемещений для расчета нагрузок на крепь стволов было предложено Ф.А.Балаенко в виде

$$U_\infty - U_0 = U_к(P), \qquad (1)$$

где $U_\infty$ – радиальное перемещение контура выработки по истечении достаточно большого промежутка времени от момента обнажения; $U_0$ – радиальное перемещение контура выработки до ввода крепи в работу с массивом пород; $U_к(P)$ – радиальное перемещение контура крепи под нагрузкой $P$.

Методы расчета нагрузок по схеме взаимодействия развивались К.В.Руппенейтом, Н.С.Булычевым, А.Г.Протосеней и другими исследователями.

При малых величинах нагрузки глина деформируется в рамках упругой модели. Рассмотрим упругую модель взаимодействия крепи с массивом пород по Г.Н.Савину [4]. Крепь и массив пород считаются выполненными из упругого изотропного материала с различными деформационными характеристиками. Крепь вводится в работу с массивом без зазора, т.е. мгновенно после обнажения массива. Нагрузка на крепь:

$$P = \sigma_r = 0{,}5(1+\lambda)\gamma H \frac{(1+\chi)(c^2-1)}{A(2-c^2)+Bc^2} +$$

$$+ 0{,}5(\lambda-1)\gamma H \frac{1+\chi}{D_1} \times [A(4c^2-3c^4-1) + \quad (2)$$

$$+ Bc^4(c^4-4c^2+3)]\cos 2\theta,$$

где

$$D_1 = c^2\left(\chi + \frac{E}{E_к}\right)\left[A\left(3c^4-6c^2+4\right)+Bc^6\right]+$$

$$+\left(\chi_1 \frac{E}{E_к} - \chi\right)\left(A+Bc^6\right); \quad (3)$$

$$A = \frac{E}{E_к} - 1; \;\; B = 1 + \chi_1 \frac{E}{E_к}; \quad (4)$$

$$\chi = 3-4\nu; \quad \chi_1 = 3-4\nu_к;$$

$\lambda$ – коэффициент бокового распора; $\gamma$ – удельный вес пород; $H$ – глубина заложения тоннеля; $c = R_1/R_0$; $R_1$ – внешний радиус крепи; $R_0$ – внутренний радиус крепи; $\theta$ – угол между осью $x$ и рассматриваемым сечением обделки; $E$ и $E_к$ – соответственно модуль упругости пород и крепи; $\nu$ и $\nu_к$ – соответственно коэффициент Пуассона пород и крепи.

Расчет по формуле (2) показывает, что величина расчетной нагрузки существенно превышает фактическую, получаемую из натурных исследований.

При взаимодействии обделки с грунтом крепь вступает в работу с массивом не мгновенно, а на некотором расстоянии от забоя. Для приближения расчетных значений нагрузок к фактическим нужно учитывать влияние забоя.

В работе [3] показано, что решение задачи взаимодействия (1) сводится к контактной задаче – задаче механики сплошных сред. При этом модуль упругости нужно заменить приведенным модулем, определяемым по формуле

$$E_к^* = \exp\left(-\alpha_1 l / R\right) E_к, \quad (5)$$

где $R$ – радиус выработки; $\alpha_1$ – константа, определяемая на основе натурных наблюдений; $l$ – расстояние от места возведения крепи до забоя.

Анализ натурных данных взаимодействия различных типов обделок с массивом дает основание преобразовать величину $l$ (рис.2):

$$l = l_0 + l_к, \quad (6)$$

где $l_0$ – расстояние от забоя до места возведения обделки; $l_к$ – дополнительное расстояние от места возведения обделки, на котором она вступит в работу с массивом.

Для нахождения $\alpha_1$ используем аппроксимацию [3]:

$$U_0 = U_{(\infty)} f(l), \quad (7)$$

где $f(l)$ – функция, учитывающая влияние забоя на развитие перемещений в призабойной зоне выработки.

Функцию $f(l)$ определим из экспоненциальной зависимости [1,2]:

$$f(l) = 1 - \exp\left(-\alpha_1 l_1 / R\right), \quad (8)$$

где $l_1$ – расстояние, на котором влияние забоя на смещение контура в сторону выработки прекращается (на основании натурных наблюдений).

Для определения константы $\alpha_1$ внесем функцию (8) в (7):

$$U_0 = U_{(\infty)}\left(1 - \exp\left(-\alpha_1 l_1 / R\right)\right), \quad (9)$$

Показатель $\alpha_1$ находится из условия, что при $l = 4R_1$, $U_0 = 0{,}01U_{(\infty)}$.

Подставляя приведенный модуль упругости (5), учитывающий контактные условия системы крепь-порода, в соотношения (3) и (4), получим окончательные формулы по определению нагрузки на обделку тоннеля.

Деформирование кембрийских глин во времени происходит с учетом их ползучести (вязкоупругая модель), описываемой ядром наследственности в виде степенной функции:

$$L(t-\tau)=\delta(t-\tau)^{-\alpha}, \qquad (10)$$

где $\delta$ – характеристики ползучести, полученные экспериментально.

Для решения задач теории ползучести вместо упругих постоянных Работновым предложено использовать временные функции:

$$E_t=\frac{E}{1+\Phi};\ \nu_t=0{,}5-\frac{0{,}5-\nu}{1+\Phi}, \qquad (11)$$

где $\Phi$ – функция ползучести,

$$\Phi=\frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha}.$$

Внося соотношения (11) в формулы по определению нагрузки на обделку тоннелей (2) – (4), получим окончательные формулы по определению нагрузок при вязкоупругой модели.

Для проверки теоретических расчетов выполнено компьютерное моделирование процесса изменения напряжений на контакте обделки с массивом в зависимости от физико-механических и реологических свойств

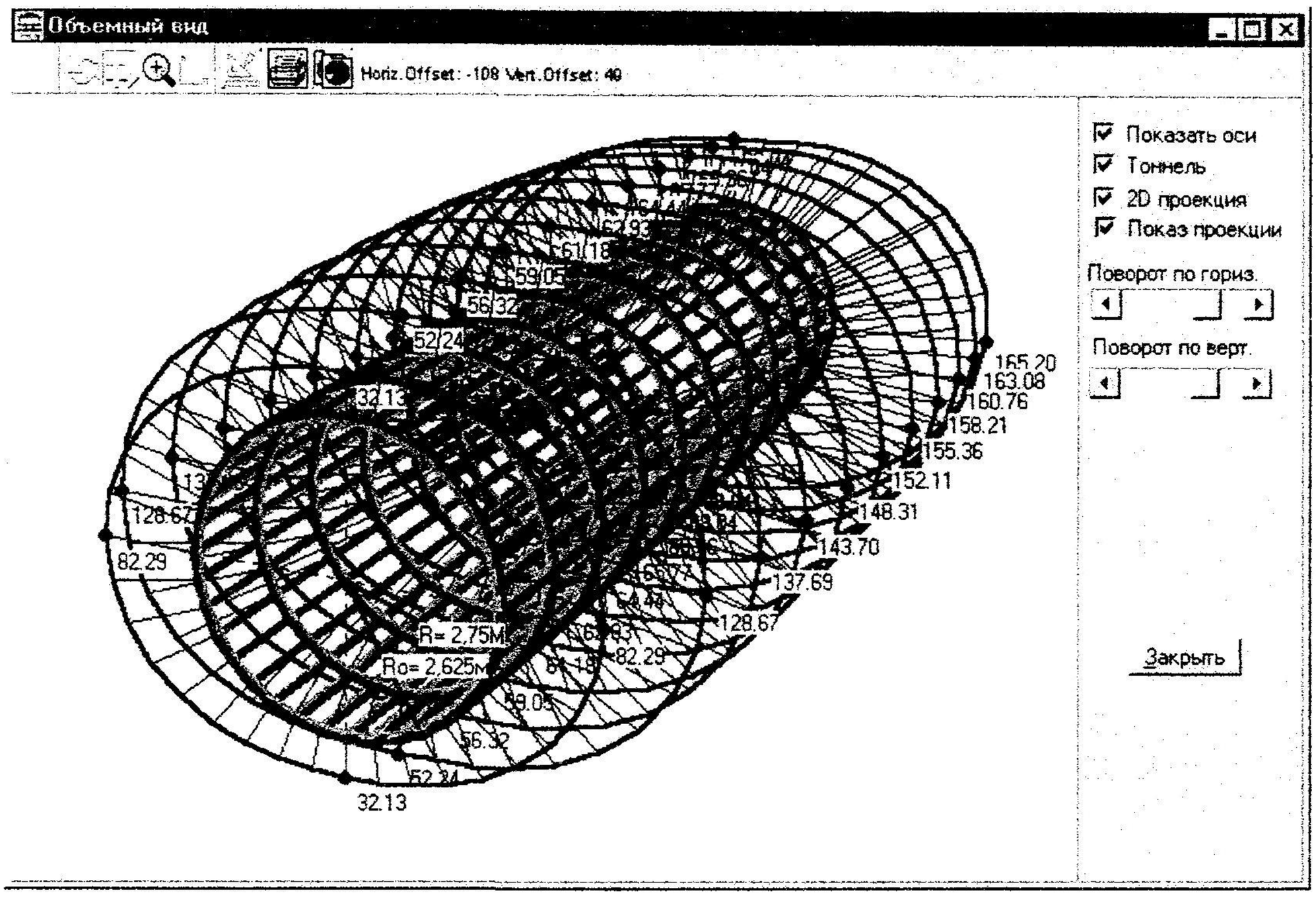



Рис.3. Объемный вид решаемой задачи

**Сравнительные результаты величин расчетных и фактических (по данным натурных исследований) нагрузок на обделку перегонных тоннелей**

| Тип обделки | $H$, м | $R_{св}$, м | $R_{вч}$, м | $E_к$, МПа | $E_{гр}$, МПа | $\nu_к$ | $\nu_{гр}$ | $l$, м | $t$, сут. | $q_ф$, кПа | $q_р$, кПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обжатая | 60 | 2,665 | 2,815 | 30000 | 762 | 0,15 | 0,25 | 5,6 | 750 | 490 | 450 |
| Сборная | 40 | 2,5 | 2,75 | 35000 | 762 | 0,15 | 0,25 | 8,0 | 420 | 220 | 232 |

массива и обделки, а также от технологии строительства.

Программный модуль «Геомеханика» выполнен в среде DELPHI for Windows. Объем рабочей программы составляет 267 кБ. Программа написана с использованием стандартных объектов библиотеки и функций DELPHI, имеет главное и несколько вспомогательных окон. Во вспомогательных окнах реализованы диалоги и панели управления для удобства работы с программой, которые управляются главным меню. Программа позволяет производить графическую двухмерную и объемную интерпретацию расчетных данных и выводить результаты работы программы на принтер, работать с объемным видом формирования напряжений на контакте обделки с массивом (рис.3), основными зависимостями напряжений от влияющих факторов.

Программа позволяет выбрать геомеханическую модель взаимодействия обделки с массивом – упругую либо вязкоупругую.

Рассмотрим численное решение определения нагрузок на обделку по предлагаемой методике для двух технологических схем проходки. Первая схема – щитовая проходка с обжатой на породу обделкой. Вторая – эректорная проходка со сборной железобетонной обделкой.

Исходные данные и средние нагрузки, полученные по данным натурных исследований $q_ф$ и расчетным путем $q_р$ сведены в таблицу.

Сравнивая расчетные нагрузки на обделку по предлагаемой методике с натурными данными, можно сказать, что расчетные величины нагрузок сопоставимы с величинами нагрузок, полученных натурными исследованиями, и не превышают их более, чем на 9-10 %.

Предлагаемый метод может быть использован для расчета нагрузок на обделки тоннелей, сооружаемых в протерозойских глинах.

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Протосеня А.Г.* Расчет нагрузок на крепь вертикальных стволов при больших глубинах / А.Г.Протосеня, Б.В.Боский, Ю.С.Обручев // Шахтное строительство. 1974. № 1. С.4-6.

2. *Протосеня А.Г.* Расчет нагрузок на крепь глубоких стволов, сооружаемых в сложных горно-геологических условиях / А.Г.Протосеня, А.М.Козел, В.А.Борисовец // Шахтное строительство. 1984. № 6. С.13-15.

3. *Протосеня А.Г.* О постановке задач по расчету нагрузок на крепь капитальных выработок и тоннелей. // Устойчивость и крепление горных выработок. Крепление и поддержание горных выработок / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1992. С.4-8.

4. *Савин Г.Н.* Концентрация напряжений около отверстий / ГИТТЛ. М., Л., 1951. 494 с.


Научный руководитель профессор, д.т.н. *А.Г.Протосеня*