



**ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА НАГРУЗОК НА КРЕПЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

**В. М. Серяков**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: vser@misd.nsc.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Предложен метод расчета напряженно-деформированного состояния крепи, позволяющий при любых значениях их механических параметров учитывать величину смещений контура выработки до его контакта с крепью. Метод основан на использовании матрицы жесткости, формируемой для нетронутого горными работами породного массива. Моделирование образования выработки и совместного деформирования крепи и приконтурного массива проведено с помощью итерационных процедур методов начальных напряжений и начальных деформаций. Разработан алгоритм и комплекс программ для расчета нагрузок на крепь горных выработок.

*Породный массив, выработка, крепь, напряженно-деформированное состояние, метод расчета, алгоритм, зоны опорного давления*

**A METHOD FOR CALCULATING LOADS ON MINE SHAFT LINING**

**V. M. Seryakov**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: vser@misd.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630090, Russia*

A method for calculating the stress-strain state of the lining of mined-out area at any mechanical parameters, allowing to take into account any displacements of the contour of excavated rock surface before it contacts with the lining is proposed. The method is based on the use of the intact rock mass stiffness matrix formed prior to mining. Modeling of the cavity growth and joint deformation of the lining and rock mass surrounding the excavation opening is performed using iterative procedures of the methods of initial stresses and initial strains. An appropriate algorithm and software complex for calculating loads on the lining of mined-out area have been developed.

*Rock mass, development, support, stress-strain state, calculation method, algorithm, bearing pressure zones*

Усложнение условий отработки месторождений полезных ископаемых, ведение горных работ на глубинах, где исходный уровень напряжений сравним с пределами прочности горных пород, предъявляют повышенные требования к технологии крепления выработок, обеспечивающей необходимый срок их работы [1, 2]. Для выбора механических характеристик крепи с учетом технологических особенностей ее возведения большое значение имеет расчетная схема, принятая для определения напряженно-деформированного состояния крепи и окружающего выработку массива горных пород [3].

При проведении большинства расчетов применяется традиционная постановка, предполагающая, что область, представляющая собой выработку с возведенной в ней крепью, деформируется под действием веса вмещающих пород и усилий на ее границах, соответствующих исходному напряженному состоянию породного массива (рис. 1). Основным недостатком такой

постановки состоит в том, что при ее применении не учитывается величина свободного деформирования контура выработки, происходящего до момента возведения крепи. Это может привести к существенному превышению расчетных величин напряжений и деформаций в крепи и в окружающем массиве над действительно формирующимися в натуральных условиях.

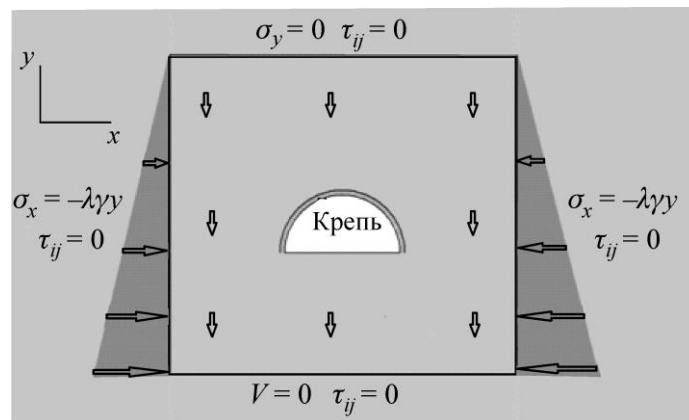


Рис. 1. Схема традиционной постановки задачи расчета напряженно-деформированного состояния крепи и породного массива в окрестности выработки:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  — нормальные и касательная компоненты тензора напряжений;  $\gamma$  — объемный вес пород;  $\lambda$  — коэффициент бокового распора;  $V$  — вертикальная компонента вектора перемещений

Необходимость учета свободного деформирования контура выработки при расчете крепи следует и из рис. 2, где показаны упругие смещения контура круглой выработки в окрестности забоя [3]. Радиальные смещения границы выработки даже на линии забоя уже достигают 30 % от их полных упругих значений.

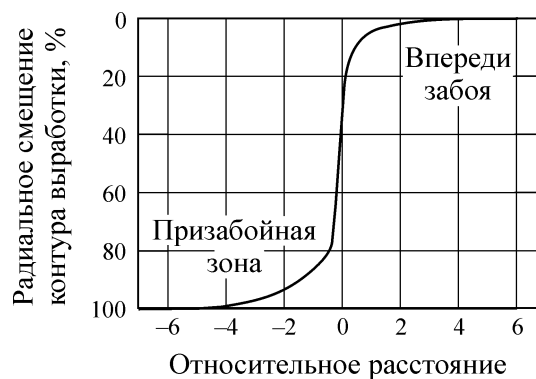


Рис. 2. Зависимость относительных радиальных смещений контура выработки круглого сечения от расстояния до забоя в долях радиуса выработки при упругом деформировании горных пород [3]

Значительно реже используются постановки, учитывающие технологические особенности возведения крепи. В этом случае рассматриваются два этапа расчета. На первом этапе происходит расчет напряженно-деформированного состояния массива при свободном деформировании контура выработки. На втором этапе учитывается контакт контура выработки с крепью и моделируется их совместное деформирование [4, 5]. Основная трудность использования такого подхода — определение усилий, которые необходимо снять с контура выработки на первом этапе решения до момента контакта крепи и массива. Кроме того, возникает вопрос о постановке задачи совместного деформирования крепи и породного массива под действием оставшейся части усилий на контуре выработки, так как схема реализации этих усилий до сих пор является не до конца решенной задачей. Таким образом, анализ методов расчета напряженно-деформированного состояния крепи горных выработок показывает их общий недостаток — неполный

учет особенностей механического взаимодействия крепи с массивом горных пород. Следовательно, весьма актуально направление развития расчетных методик, учитывающее детальное деформационно-силовое взаимодействие массива с крепью.

Разработанный в ИГД СО РАН метод расчета напряженно-деформированного состояния породного и закладочного массивов в ходе ведения горных работ предлагается использовать в качестве основы для определения полей напряжений в крепи с учетом особенностей ее контактного взаимодействия с контуром выработки. Расчет предполагает использование метода конечных элементов, с формированием матрицы жесткости расчетной системы для исходного массива горных пород без наличия пройденных в нем выработок. В ходе ведения горных работ матрица жесткости не меняется [6]. Моделирование выработанных пространств и размещения в них закладки или элементов крепи с другими физико-механическими свойствами осуществляется с помощью итерационной процедуры метода начальных напряжений, при использовании которой меняется только правая часть решаемой системы линейных уравнений [7]:

$$[K]\{\delta\} = \{F\} + \{F\}_{\{\sigma^h\}} \quad \{F\}_{\{\sigma^h\}} = \int_V [B]^T \{\Delta\sigma^h\} dv.$$

Здесь  $[K]$  — матрица жесткости расчетной системы;  $[B]$  — матрица связи между деформациями в конечных элементах и смещениями узлов;  $\{F\}$  — вектор внешних узловых сил;  $\{F\}_{\{\sigma^h\}}$  — вектор узловых сил в конечном элементе, вызванный начальными напряжениями  $\sigma^h$ .

Компоненты тензора напряжений для вычисления вектора начальных узловых сил определяются по формулам

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_x^h &= \sigma_x^1 - \sigma_x^2 = (\lambda^1 - \lambda^2)e + 2(G^1 - G^2)\varepsilon_x, \\ \Delta\sigma_y^h &= \sigma_y^1 - \sigma_y^2 = (\lambda^1 - \lambda^2)e + 2(G^1 - G^2)\varepsilon_y, \\ \Delta\sigma_z^h &= \sigma_z^1 - \sigma_z^2 = (\lambda^1 - \lambda^2)e + 2(G^1 - G^2)\varepsilon_z, \\ \Delta\tau_{xy}^h &= \tau_{xy}^1 - \tau_{xy}^2 = (G^1 - G^2)\gamma_{xy}, \\ \Delta\tau_{xz}^h &= \tau_{xz}^1 - \tau_{xz}^2 = (G^1 - G^2)\gamma_{xz}, \\ \Delta\tau_{yz}^h &= \tau_{yz}^1 - \tau_{yz}^2 = (G^1 - G^2)\gamma_{yz}, \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$  — соответствующие компоненты тензора деформаций;  $e$  — объемная деформация,  $\lambda^1, \lambda^2, G^1, G^2$  — константы Ламе, соответствующие исходному массиву и материалу крепи.

Зависимость между интенсивностями деформаций и напряжений, полученная с использованием этих формул, имеет вид

$$\Delta\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\Delta\sigma_x - \Delta\sigma_y)^2 + (\Delta\sigma_y - \Delta\sigma_z)^2 + (\Delta\sigma_z - \Delta\sigma_x)^2 + 6(\Delta\tau_{xy}^2 + \Delta\tau_{yz}^2 + \Delta\tau_{zx}^2)} = 3(G^1 - G^2)\varepsilon_i$$

и представляет собой частный случай “единой кривой”, применяемой в теории малых упруго-пластических деформаций (рис. 3а).

Однако итерационная процедура метода начальных напряжений имеет ограниченную область применения в задачах расчета напряженного состояния крепи в обсуждаемых задачах, так как ее можно реализовать только при значении модуля Юнга материала крепи, меньшим или незначительно отличающимся от модуля Юнга породного массива. При значительном превышении модулем Юнга материала крепи значений модуля Юнга породного массива итерационный процесс с применением метода начальных напряжений расходится. Для преодоления этих трудностей предлагается использовать итерационную процедуру метода начальных деформаций (рис. 3б).

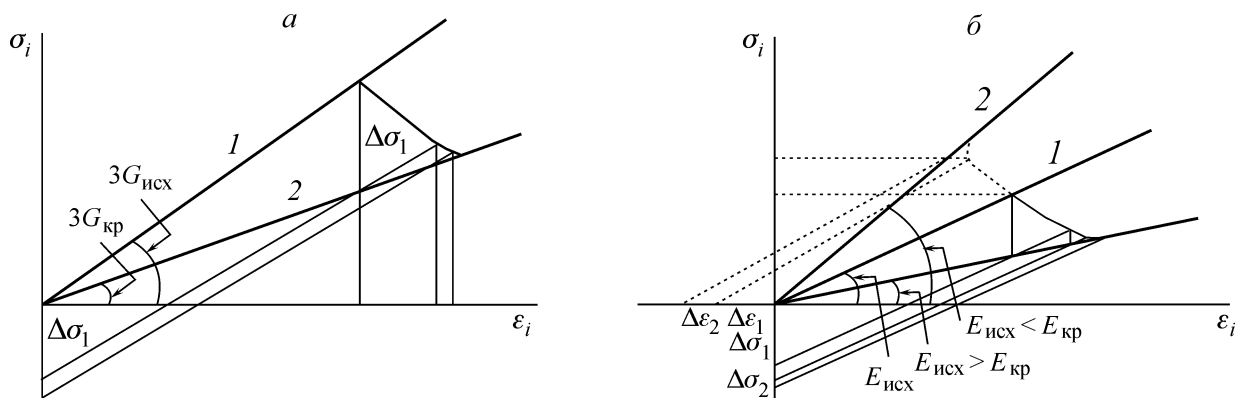


Рис. 3. Схемы применения методов начальных напряжений (а) и начальных напряжений и начальных деформаций (б) при решении задач деформирования элементов крепи: 1 — зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций для исходного массива горных пород; 2 — аналогичная зависимость для материала крепи;  $\Delta\sigma_i$ ,  $\Delta\epsilon_i$  — величины “невязки” интенсивностей напряжений и деформаций, используемые для расчета вектора начальных узловых сил;  $E_{исх}$ ,  $E_{кр}$ ,  $G_{исх}$ ,  $G_{кр}$  — модули Юнга и модули сдвига, соответствующие исходному массиву и материалу крепи

Из рис. 4 следует, что совместное применение итерационных процедур метода начальных деформаций и метода начальных напряжений позволит проводить расчеты при любых соотношениях между модулями Юнга крепи и породного массива. Компоненты вектора начальных узловых сил, соответствующих методу начальных деформаций, вычисляются по формуле:

$$\{F\}_{\{\epsilon^H\}} = \int_V [B]^T [D] \{\Delta\epsilon^H\} dv.$$

Предложенные разработки реализованы в комплексе программ, позволяющих проводить расчеты напряженного состояния крепи и окружающего выработку массива с учетом особенностей их взаимодействия при любых механических характеристиках горных пород и материала крепи. В качестве примера на рис. 4 приведены некоторые результаты расчетов при модуле Юнга материала крепи, превышающем в десять раз модуль Юнга вмещающего массива. Исходное напряженное состояние массива принято удовлетворяющем гипотезе Динника. Модуль Юнга вмещающего массива 25000 МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.25$ .

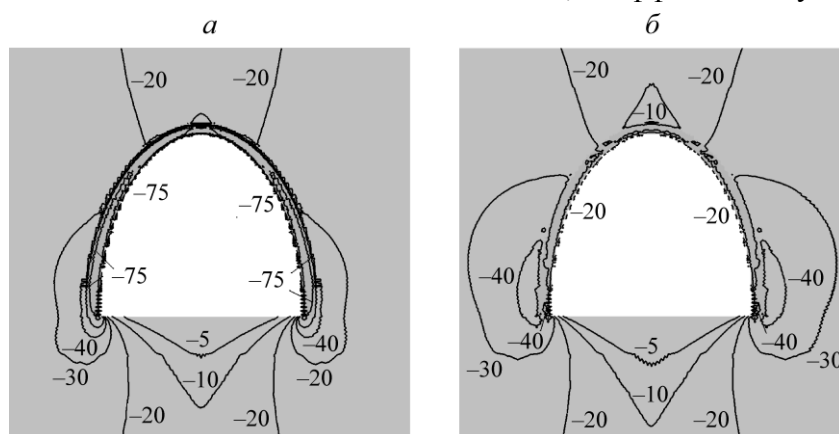


Рис. 4. Распределение вертикального напряжения в крепи и в породном массиве, МПа: а — смещения контура выработки до контакта составляют 10% от полных смещений незакрепленной выработки; б — 60%

Вступление крепи в работу после реализации части смещений контура незакрепленной выработки приводит к качественному перераспределению напряжений в зонах опорного давления: формируются две области концентрации вертикальных напряжений (рис. 4б).

## ВЫВОДЫ

Предложен метод расчета напряженно-деформированного состояния крепи и окружающих выработку горных пород, учитывающий величину смещений контура выработки до момента ввода крепи в работу. Разработан алгоритм расчета, позволяющий получать решение при значительном отличии значений механических параметров крепи и породного массива.

При действии гравитационного поля исходных напряжений зоны наибольшего сжатия в крепи, возводимой в выработке сводчатого сечения, формируются в нижней части крепи в районе ее контакта с почвой выработки. Концентрация сжимающих напряжений в этих зонах сохраняется и при дальнейшем увеличении смещений свободного контура выработки.

Совместное деформирование крепи и вмещающего массива после осуществления частичного свободного деформирования контура выработки приводит к появлению двух областей концентрации вертикальных напряжений. Одна из них образуется после деформирования массива горных пород вокруг незакрепленной выработки. Вторая возникает в ходе совместного деформирования массива и крепи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Bulychev N. S.** Mechanics of Underground Structures, Moscow, Nedra 1994, 278 pp. (in Russian) [Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1994. — 278 с.]
2. **Kartozia B. A., Fedunets V. I., Shuplik M. N., et al.** Mine and Underground Construction: University Textbook, Moscow, Gornaya Kniga, 2003, vol. 2, 815 pp. (in Russian) [Картозия Б. А., Федунец В. И., Шуплик М. Н. и др. Шахтное и подземное строительство: учебник для вузов. Т. 2. — М.: Изд-во МГГУ “Горная книга”, 2003. — 815 с.]
3. **Protosenya A. G., Dolgy E. I., Ogorodnikov Yu. N., et al.** In Mining and Underground Construction in Examples and Tasks, SPb., Publishing house Mining Institute, 2003, 312 pp. (in Russian) [Протосеня А. Г., Долгий И. Е., Огородников Ю. Н. и др. Шахтное и подземное строительство в примерах и задачах. — СПб.: Изд-во Горного института, 2003. — 312 с.]
4. **Bulychev N. S.** Mechanics of Underground Structures in Examples and Problems, Moscow, Nedra, 1989, 273 pp. (in Russian) [Булычев Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. — М.: Недра, 1989. — 273 с.]
5. **Baklashov I. V. and Kartozia B. A.** Mechanics of Underground Structures and Support Units, Moscow, Nedra, 1984, 415 pp. (in Russian) [Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. — М.: Недра, 1984. — 415 с.]
6. **Seryakov V. M.** Calculating Stresses in Support and Sidewall Rocks in Stagewise face Drivage in Long Excavations, Journal of Mining Science, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 673–678.
7. **Zienkiewicz O.** The Finite Element Method in Engineering, Mir, Moscow, 1975, 576 pp. [Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 576 с.]