



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫРАБОТОК  
С УЧЕТОМ ГРАВИТАЦИИ**

**В. Е. Миренков**

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

Основное направление при исследовании деформирования массива пород с ослаблениями в работе опирается на фундаментальное свойство практического характера, ограничивающего уход в область некорректности: влияние реальной выработки как по напряжениям, так и по смещениям затухает до нуля при удалении от нее — это аксиома. Предлагается свести проблему к рассмотрению дополнительной задачи с растягивающими напряжениями на контуре, обеспечивающими существование единственности и корректности упругого решения.

*Выработка, нетронутый массив, граничные условия, расчет, напряжения, смещения*

**MODELING STRAIN STATE OF UNDERGROUND EXCAVATIONS  
WITH REGARD TO CHANGE IN THE GRAVITY FIELD**

**V. E. Mirenkov**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: mirenkov@misd.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

Studying of rock mass deformation with weak zones is based on the principal property of applied nature that limits incorrectness: the influence of an underground excavation on the stresses and displacements in rock mass attenuates to zero as the distance increases — this is a postulate. The author suggests reducing the problem to solving an additional problem on tensile stresses at the underground excavation boundary to ensure uniqueness and correctness of the elastic solution.

*Underground excavation, intact rock mass, boundary conditions, calculation, stresses, displacements*

При расчете напряжений в окрестности полостей рассматривают поле напряжений нетронутого массива пород в двумерном случае в виде

$$\sigma_y = -\gamma(H - y), \quad \sigma_x = -\lambda\gamma(H - y), \quad (1)$$

где  $\gamma$  — удельный вес пород;  $H$  — расстояние от дневной поверхности до рассматриваемой точки;  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  — главные напряжения. Модель (1) используется при расчетах напряжений и смещений около ослаблений, начиная с работ [1–3], в которых в центре будущей выработки по (1) определяются главные сжимающие напряжения

$$\sigma_y = -\gamma H, \quad \sigma_x = -\lambda\gamma H. \quad (2)$$

Проблема расчета напряжений и смещений в [1–3] сводится к рассмотрению дополнительной упругой задачи для плоскости с аналогичным ослаблением, на контуре которого действуют напряжения (2) с обратным знаком. Симметрия граничных растягивающих напряжений в породах кровли и почвы выработки обеспечивает существование единственности и корректности дополнительной задачи.

Расчет напряжений ввиду сложного контура выработанного пространства будем проводить численным методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы Ansys. В основе МКЭ предположение, что чем больше область счета, тем точнее результат. Поэтому трактовка постоянных сжимающих напряжений эквивалентна сжатию на бесконечности для аналитического решения, к которому стремятся при численном счете. Отсюда следует, что в работах [4–8] объединены модель (1), не предполагающая деформирования, и упругая модель конечных элементов.

**Расчет заглубленной выработки.** Основное направление при исследовании деформирования массива пород с ослаблениями опирается на фундаментальные свойства практического характера: влияние реальной выработки как по напряжениям, так и по смещениям затухает до нуля при удалении от нее — это аксиома. Именно эти данные важны для выбора направления получения упругого численного решения МКЭ. В качестве примера рассмотрим двумерный случай квадратной выработки со стороной  $l$  (рис. 1), здесь нас интересует факт затухания напряжений и смещений при удалении от выработки независимо от граничных условий. В поле напряжений нетронутого массива пород в центре будущей выработки главные напряжения, согласно (1), будут  $\sigma_y = -\gamma H$ ,  $\sigma_x = -\lambda\gamma H$ . Эти значения напряжений необходимы, чтобы сформулировать граничные условия упругой задачи. Возникает вопрос, какие граничные условия нужно сформулировать на контуре выработки, чтобы получить совпадение с натурным экспериментом (рис. 1), в этом — формулировка задачи.

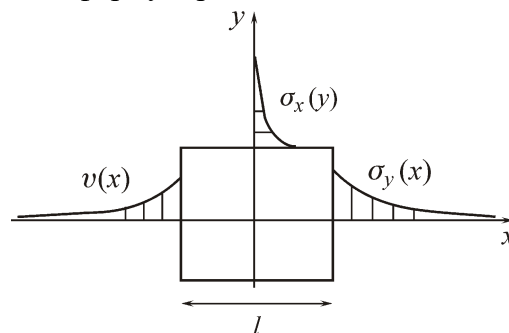


Рис. 1. Натурный эксперимент приращений смещений  $v(x)$  и напряжений  $\sigma_y(x)$ ,  $\sigma_x(y)$  при удалении от выработки

На контуре возможного ослабления

$$\sigma_y = -\gamma(H - h), \quad \sigma_x = -\lambda\gamma(H - h) \quad \text{на } y = h, \quad (3)$$

$$\sigma_y = -\gamma(H + h), \quad \sigma_x = -\lambda\gamma(H + h) \quad \text{на } y = -h,$$

где  $2h = l$  — мощность будущей выработки. Если уберем собственный вес пород (гравитацию) при создании выработки, тогда давление на  $y = -h$  уменьшится на  $-2\gamma h$  и вместо (3) получим симметричные сжимающие напряжения относительно осей  $x$  и  $y$ . Упругое решение для выработки предполагает напряжения на контуре, обеспечивающие замеренный закон убывания  $\sigma_y(x)$  и  $v(x)$  (рис. 1). Действительно, сложив дополнительное решение с исходным полем напряжений с вынутыми породами, получим на контуре нулевые значения и в каждой точке свое напряженное состояние при нулевых дополнительных приращениях напряжений и смещений на бесконечности, что отвечает эксперименту (рис. 1).

Для получения совпадения с экспериментом на рис. 2 приведены классические формулировки граничных условий в предположении, что на контуре полости значения напряжений нулевые [4–8]. Только аналитическое решение позволяет явно определить вырожденность предложенной формулировки. Пусть сжимающие усилия действуют только вдоль оси  $x$ , как показано на рис. 2.

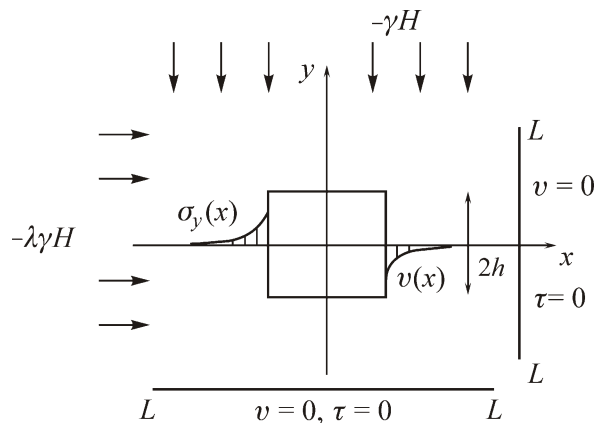


Рис. 2. Классическая схема формулировки граничных условий при расчете деформирования выработок

Это решение приведено в [9], но поскольку смещения неограниченно возрастают, оно не имеет физического смысла.

**Выработка на разных стадиях образования.** Рассмотрим случай последовательной формулировки граничных условий при очистной выемке пласта полезного ископаемого, представленного на рис. 3. Исходное поле напряжений нетронутого массива рассмотрим в виде главных напряжений относительно осей  $y$  и  $x$

$$\sigma_y = -\gamma y, \quad \sigma_x = -\lambda\gamma y, \quad (4)$$

где  $y$  — расстояние от дневной поверхности до рассматриваемой точки. На рис. 3а изображен нетронутый массив пород согласно (4), в котором нет выработки, т. е. весомый блок пород  $A$ , изображающий будущую выработку на месте. Существенно, что блок  $A$  передает давление непрерывно на почву выработки  $y = H + h$ , добавляя собственный вес  $-\gamma h$  к значению  $-\gamma H$  для  $y = H$ .

На рис. 3б представлен нетронутый массив пород, следуя (4), но с вынутым весомым блоком  $A$  (аналог выработки), т. е. добавки на  $y = H + h$  в виде  $-\gamma h$  не будет и там останется  $-\gamma H$ , обеспечивая симметрию сжимающих напряжений  $\sigma_y = -\gamma H$  на  $y = H$  и  $y = H + h$ . Схема на рис. 3б является основной при формулировке дополнительной задачи для невесомой плоскости с выработкой. Решение проблемы (рис. 3в) существует единственно и корректно. Вернув на место блок  $A$  (в виде добавки  $-\gamma h$ ) придем к исходному состоянию рис. 3а.

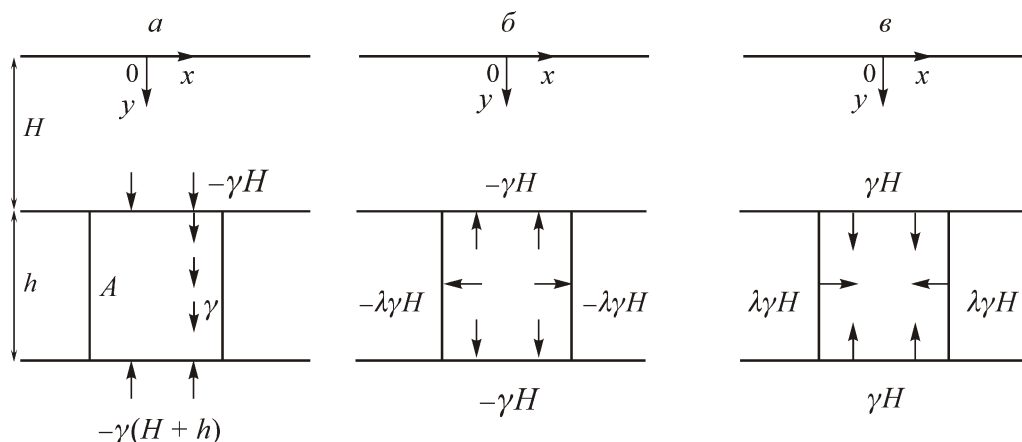


Рис. 3. Схема очистной выработки на разных стадиях образования: а — нетронутый массив пород (нет выработки); б — нетронутый массив пород с убраным весомым блоком  $A$ ; в — дополнительная задача при расчете смещений и напряжений, вызванных проведением выработки

## ВЫВОДЫ

Классический подход при расчете напряженно-деформированного состояния около выработок объединяет модель нетронутого массива, не учитывающего смещения и упругую модель, основанную на деформациях. Наличие в схеме расчета линий с значениями нулевых смещений и касательных напряжений никак не комментируется, предполагая скачки напряжений и смещений на них в процессе счета.

Сведение проблемы восстановления напряжений и смещений около выработок к дополнительной задаче упрощает процесс получения упругого решения и обеспечивает корректность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

1. **Mikhlin S. G.** Stresses in rocks under a coal seam, News of the USSR Academy of Sciences. OTN, 1942, no. 7-8, pp. 13–28. [**Михлин С. Г.** О напряжениях в породе под угольным пластом // Изв. АН СССР. ОТН. — 1942. — № 7-8. — С. 13–28.]
2. **Barenblatt G. I. and Khristianovich S. A.** Roof falls in underground excavations, News of the USSR Academy of Sciences, OTN, 1955, no. 11, pp. 73–86. [**Баренблатт Г. И., Христианович С. А.** Об обрушении кровли при горных выработках // Изв. АН СССР. ОТН. — 1955. — № 11. — С. 73–86.]
3. **Kurlenya M. V. and Mirenkov V. E.** Phenomenological model of rock deformation around mine workings, Journal of Mining Science, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 181–186. [**Курленя М. В., Миренков В. Е.** Феноменологическая модель деформирования горных пород вокруг выработок // ФТПРПИ. — 2018. — № 2. — С. 3–9.]
4. **Mirsalimov V. M.** Maximum strength of opening in crack-weakened rock mass, Journal of Mining Science, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 9–17. [**Мирсалимов В. М.** Максимальная прочность выработки в горном массиве, ослабленном трещиной // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 12–21.]
5. **Neverov A. A., Neverov S. A., Tapsiev A. P., Shchukin S. A., and Vasichev S. Yu.** Substantiation of geotechnologies for underground ore mining based on the model representations of change in the natural stress field parameters, Journal of Mining Science, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 582–595. [**Неверов А. А., Неверов С. А., Тапсиёв А. П., Щукин С. А., Васичев С. Ю.** Обоснование геотехнологий выемки рудных месторождений на основе развития модельных представлений об изменении параметров природного поля напряжений // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 74–89.]
6. **Mirsalimov V. M.** Modeling partial closure of a variable-width slot with cohesion-end zones in rock mass, Journal of Mining Science, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 11–22. [**Мирсалимов В. М.** Моделирование частичного закрытия щели переменной ширины с концевыми зонами в массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 11–22.]
7. **Hua H. T.** Study and application of numerical simulation of high cutting gobside entry retaining surrounding rock deformation law, Coal Technol., 2018, 37(09), pp. 61–64.
8. **Lan W. J., Wang H. X., Zhang X., and Chen S. S.** Sealing properties and structure optimization of packer rubber under high pressure and high temperature, Petroleum Sci., 2019, vol. 16, issue 3, pp. 632–644.
9. **Muskhelishvili N. I.** Some Basic Problems in Mathematical Elasticity, Moscow, Nauka, 1966, 708 pp. [**Мусхелишвили Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука. — 1966. — 708 с.]