

$$G_i^p = W_1 c t h W_1;$$

$$W_1 = \frac{P_{ik+1}^m - P_{ik-1}^m}{2P_{ik}^m} + \frac{h}{2y_k} + \frac{k_{ik+1}^m - k_{ik-1}^m}{4k_{ik}^m} - \frac{R_0 \mu_{1m}}{k_{ik}^m P_{ik}^m} \cdot \frac{u_i^m - u_{i-1}^m}{\Delta t};$$

$$G_i^a = W_2 c t h W_2; \quad W_2 = \frac{h}{2y_k} + \frac{D_{ik+1}^m - D_{ik-1}^m}{4D_{ik}^m} - \frac{R_0}{D_{ik}^m} \cdot \frac{u_{ik}^m - u_{i-1k}^m}{\Delta t};$$

$G_i^p, G_i^a$  - параметры подгонки;  $M$  - шаг координатной сетки;  $h = (1-\epsilon)M$ .

Следует отметить, что уравнения (16)...(18) удовлетворяют условиям, обеспечивающим сходимость вычислительного процесса, то есть последовательность Ньютона сходится к решению нелинейной системы (12)...(14).

Таким образом, полученные соотношения (20)...(23) являются решением системы уравнений, описывающих состояние трехфазной среды с граничным условием (1) и могут служить алгоритмом для численной оценки деформированного состояния газонасыщенного углепородного массива при технологическом воздействии гармонического типа с учетом свободного и сорбированного газа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лях В.В., Минеев С.П. Математическое моделирование вибровоздействия на газонасыщенный углепородный массив // Прикладная математика и механика. - Том 58. - Вып. 1, 1994. - С. 69-76.
2. Подильчук Ю.Н. К теории деформирования газонасыщенных пористых сред // Прикладная механика, 1976. Т. 12. - № 12. - С. 42-47.
3. Подильчук Ю.Н., Лях В.В. Исследование напряженного состояния газонасыщенного горного массива возле эллипсоидальной выработки // Прикладная механика. - Т. 16. - № 9, 1980. - С. 27-35.
4. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. - М.: Мир, 1975. - 392 с.
5. Дулан Э., Миллер Дж., Шилькерс У. Равномерные численные методы решения задачи с пограничным слоем. - М.: Мир, 1983. - 200 с.

УДК 622.267.023.67:624.138.4

Л.В.Новикова, О.А.Барабан,  
Л.И.Заславская

### ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПОРОД ВОКРУГ ЗАБОЯ ВЫРАБОТКИ

Описується методика визначення оптимальних параметрів термохімічного засобу закріплення порід в околиці забою виробки, яке проводиться в слабких водонасичених породах. Розміри ділянки закріплення встановлюються на основі аналізу напруженого стану масиву з урахуванням конкретних гірничо-геологічних умов, а оптимальні параметри визначаються методом перебору варіантів з умов мінімуму вартості функції.

Проблема обеспечения эксплуатационной устойчивости выработок различного назначения имеет первостепенное значение для горнодобывающей промышленности. Особую актуальность она приобретает в условиях слабых водонасыщенных пород. Проведение выработок в таких условиях сопровождается значительными деформациями их контуров, прорывами пльвунов. Это требует разработки специальных способов упрочнения пород. На Днепровском буро-

угольном месторождении, например, с завалами и пучением при проходке и в процессе эксплуатации выработок борются термохимическим закреплением. В качестве закрепляющего вещества используется парафин. Этот способ, как и методика расчета его параметров, разработаны в Национальной горной академии Украины [1].

Отличительной особенностью разработанной методики является то, что размеры участка закрепления устанавливаются на основе анализа напряженно-деформированного состояния массива с учетом конкретных горно-геологических условий, а параметры закрепления выделенного участка определяются из условия минимума стоимостной функции.

\*Исследуемая область массива включает подготовительную выработку в районе сопряжения ее с рукавом сооружаемого центрального водоотлива. Определяется напряженно-деформированное состояние в кровле проводимой выработки (рукава) и впереди ее забоя. Используется метод граничных элементов, основанный на концепции пластовых элементов [2]. При таком подходе внутри исследуемой области выделяется часть породного массива, мощность которой определяется размерами пройденных выработок и мала по сравнению с остальными размерами рассматриваемой области. Математически выделенная часть представляет собой плоскость (граничную поверхность). Данная поверхность делится на прямоугольные элементы. Напряжения или смещения в средних точках каждого из них выражаются через неизвестные разрывы смещений с помощью аналитического решения, полученного Л.Ронгведом [3]. Задача решается в дополнительных напряжениях. Полные напряжения  $\sigma_{ij}$  представляются в виде суммы начальных напряжений  $(\sigma_{ij})_0$ , имеющих место в массиве до проведения выработок, и дополнительных  $\sigma'_{ij}$ , обусловленных наличием выработок

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij})_0 + \sigma'_{ij} \quad (i = x, y, z; j = x, y, z).$$

В той области граничной поверхности  $z = 0$ , которая совпадает с отработанной частью массива, суммарные напряжения равны нулю, т.е.

$$(\sigma_{ij})_0 + \sigma'_{ij} = 0, \quad (1)$$

следовательно, граничные условия в ее элементах запишутся в виде:

$$(\sigma_{zz})_0 = -\gamma H; \quad (\sigma_{xx}) = (\sigma_{yy})_0 = -\lambda\gamma H. \quad (2)$$

В условиях (2)  $H$  - глубина расположения выработок;  $\gamma$  - плотность породы;  $\lambda = \frac{\nu}{\nu-1}$  - коэффициент бокового распора;  $\nu$  - коэффициент Пуассона породы.

Напряжения на граничной поверхности, совпадающей с неотработанной частью массива, пропорциональны разрывам смещений  $D_x$ ,  $D_y$  и  $D_z$ , т.е.

$$\sigma_{zz} = -K_z D_z; \quad \sigma_{xx} = -K_x D_x; \quad \sigma_{yy} = -K_y D_y. \quad (3)$$

Исходная система уравнений, представляющая собой заданные граничные условия (1) и (2), записанные с помощью соотношений базового решения [3], решается методом Гаусса. В результате определяются искомые разрывы смещений на граничной поверхности. Затем на основе принципа суперпозиции суммированием вкладов всех найденных разрывов смещений находятся напряжения и смещения в любой точке исследуемой области.

Границы зон предельного напряженного состояния устанавливаются по критерию Кулона-Мора, который в случае прямолинейной огибающей предельных кругов Мора имеет вид

$$\sigma_1 - (2\psi + 1)\sigma_3 = \sigma_c,$$

где  $\psi = \frac{\sin \rho}{1 - \sin \rho}$ ;  $\rho$  - коэффициент внутреннего трения породы;  $\sigma_c = \frac{2C \cos \rho}{1 - \sin \rho}$ ;  $C$

- коэффициент сцепления породы;  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  - главные напряжения.

По протяженности зон предельного напряженного состояния пород определяются такие геометрические параметры закрепления, как длина участка закрепления впереди забоя проводимой выработки и толщина закрепляемого слоя вокруг нее.

Для качественного термохимического закрепления выделенного участка массива необходимо установить рациональное количество заходов (с учетом возможностей технологического оборудования), требуемое количество инъекторов и длину труб для их изготовления, необходимо также определить расход закрепляющего вещества (парафина) и оптимальный радиус закрепления пород вокруг инъектора.

Природа работ по реализации перечисленных параметров закрепления различна, поэтому в качестве объединяющего их показателя выбирается функция стоимости выполнения всех работ.

Расход труб на закрепление участка массива, размеры которого установлены на основе анализа напряженного состояния, зависит от расстояний между рядами инъекторов и между инъекторами в ряду, а сами расстояния определяются радиусом закрепления пород  $r_s$  вокруг инъектора. От  $r_s$  зависит также количество расходуемого закрепляющего вещества. Следовательно, функция стоимости является функцией параметра  $r_s$  и ее можно представить в виде

$$f(r_s) = (C_1 + C_2 + C_3)L + (C_4 + C_5)Q + C_6G, \quad (4)$$

где  $C_1$  - цена 1 п.м. труб, грн.;  $C_2$  - стоимость изготовления 1 п.м. инъекторов (перфорация, нарезка и пр.), грн.;  $C_3$  - стоимость забивки и извлечения 1 п.м. инъекторов, грн.;  $L$  - длина закрепляемого участка массива, м;  $C_4$  - цена 1 т па-

парафина, грн.;  $C_5$  - стоимость закачки  $1 \text{ м}^3$  парафина, грн.;  $Q$  - количество парафина, подсчитанное с учетом диаметра выработки, толщины закрепляемого вокруг слоя пород и длины  $L$ ;  $C_6$  - стоимость 1 квт-часа электроэнергии, грн;  $G$  - расход электроэнергии, затрачиваемой на разогрев закрепляемой породы, квт-час.

Для получения оптимального варианта величина радиуса закрепления вокруг одиночного иньектора  $r$ , изменяется с заданным шагом в пределах возможного для соответствующих горно-геологических условий. Для каждого из заданных значений  $r$ , подсчитываются требуемое количество иньекторов и суммарная их длина, определяется требуемый объем закрепляющего вещества. Результаты расчетов сравниваются между собой и выбирается вариант, требующий наименьшей стоимости (4).

Границы изменения  $r$ , устанавливались в процессе натурного эксперимента. Для песков средне- и крупнозернистых они составили 1,2...1,6 м [1].

Выполненные расчеты показали, что для обеспечения безопасности и эффективности горнопроходческих работ в Днепровском бурогольном бассейне на глубине  $H \geq 75$  м необходимо закрепить участок массива длиной  $L = 15$  м впереди забоя выработки и слой пород мощностью 1,6 м вокруг выработки. Оптимальный вариант термохимического закрепления такого участка требует расхода 0,5 м труб, 0,2 т парафина и 70 квт час электроэнергии на каждый кубический метр закрепляемой породы. При этом используется 13 иньекторов, которые располагаются по двум концентрическим окружностям при одном иньекторе в центре. Расстояние между окружностями 1,3 м, а между иньекторами - 2 м. Стоимость оптимального варианта составляет 50 тыс.грн., что в 1,5 раза меньше чем при замораживании такого же участка.

Технология термохимического закрепления водонасыщенных пород с установленными по описанной методике параметрами, успешно применена при проведении рукава №1 центрального водоотлива шахты "Верболозовская" ГХК «Александрияуголь».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработать и внедрить технологию закрепления пород вокруг горных выработок и создания противофильтрационных завес на базе отходов твердеющих углеводородов нефти: Отчет о НИР (закл.) / Государственная горная академия Украины (ГГА Украины); Руководитель В.И.Бондаренко - № ГР 01910015644.- Днепрпетровск, 1992.-76 с.
2. Крауч С., А.Старфилд. Методы граничных элементов в механике твердого тела.-М.: Мир,1987. - 328 с.
3. Rongved L. Dislocation over bounded plane over in an infinite solid // J. Appl. Mech. - 1957, № 24. - P. 252-254.

УДК 621.695.204.1

В.П. Франчук, А.П. Зиборов,  
Е.А. Кириченко

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ТРУБОПРОВОДА ГЛУБОКОВОДНОГО ГИДРОПОДЪЕМА

У роботі запропоновано методику розрахунку параметрів напружено-деформованого стану транспортного трубопроводу у складі гірничо-морських видобувальних комплексів. Приведено результати експериментальних досліджень тривкісних параметрів макету труб-