

В.И. Соколовский, Ю.А. Пшеничный, С.В. Борщевский
**ГЕОМЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ И РЕГЛАМЕНТ ТАМПОНАЖНОГО
УПРОЧНЕНИЯ ПОРОД ВОКРУГ НАКЛОННЫХ СТВОЛОВ
ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИМИ РАСТВОРАМИ**

Наведено підсумки шахтних досліджень руйнування порід навколо стволів вугільних шахт та обґрунтовано параметри їх зміцнення вязкопластичними розчинами.

**CALCULATION OF PARAMETERS PLUG-BACK S SLOPING SHAFTS
VYAZKOPLASTICHESKIMI BY SOLUTIONS**

Research results are mine destruction of rocks around the shafts of coal mines and reasonable options to strengthen viscoplastic solutions.

Ряд угольных шахт Донбасса ведут отработку запасов угля с использованием наклонных стволов. В качестве примера, можно привести шахту им. 60-летия Великой Октябрьской Социалистической революции (ВОСР), шахты «Донпромбизнес», «Юзов», «Эксимэнерго» и др. Учитывая, что горные работы ведутся на глубинах 300-800 м при угле наклона стволов 8-15 градусов их протяженность достаточно большая и достигает 1400-3058 м (шахта им. 60-летия ВОСР).

Оценивая литолого-геомеханические особенности эксплуатации стволов надо указать на такие особенности:

1) вмещающие породы характеризуются высокой степенью сложности с преимущественным наличием пород на глинистых цементах;

2) механическая неоднородность породного массива проявляется в болевой вариации прочности пород на сжатие и растяжение: $50 < \sigma_{сж} \leq 110$ МПа; $3,8 \leq \sigma_{рп} \leq 10,7$ МПа; $2,4 \leq \sigma_{рt} \leq 4,1$ МПа;

3) величина коэффициента размокания пород около 0,8, а форма разрушения первая;

4) породы непосредственной кровли по устойчивости относятся к категории Б₁-Б₄;

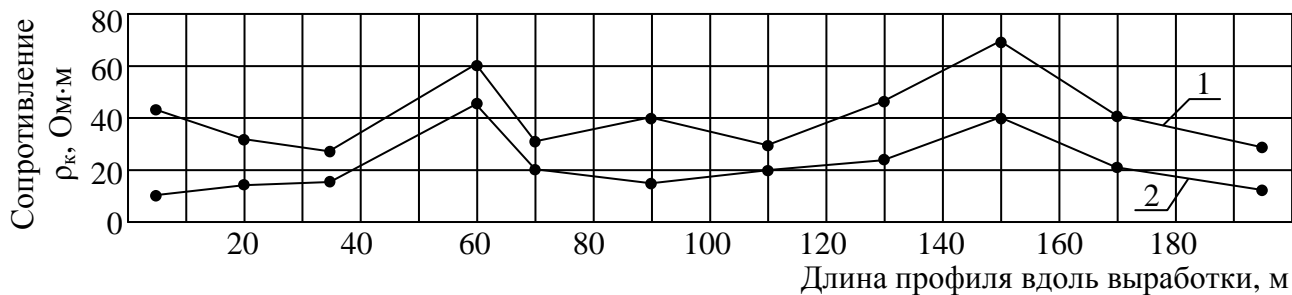
5) основная кровля по обрушаемости относится к категории А₂;

б) породы почвы сложены «кучерявчиком», сланцами и песчаником.

Оценивая геотехническое состояние наклонных стволов, следует указать, что несоответствие паспорту крепления на отдельных участках различное. В среднем по протяженности паспорту не соответствует 4,6-5,8%. Прослеживаются отдельные участки, где имеет место существенное деформирование крепи (2,3-3,7%), что требует ее ремонта. В таких случаях имеет место расслоение пород над стволом, иногда наблюдается разрушение затяжки обрушившимися породами.

Для изучения особенностей разрушения породного массива над наклонным стволом проведены электрометрические измерения с использованием аппаратуры и методики изложенной в [1]. Профилирование по шпурам проведено зондом на глубину до 3,0. Поскольку глубина проникновения низкочастотного

электрического поля в породный массив составляет 0,3-0,4 м, что значительно больше диаметра шпура и меньше расстояния от зонда до металлокреп, то обеспечивается достаточная помехоустойчивость диагностирования. Шпуры бурили по своду ствола с различным шагом расположения. Результаты электрометрических измерений приведены на рис. 1 и 2.



1 – на глубине 1,0 м; 2 – на глубине 3,0 м

Рис. 1 – Данные шпуровой электрометрии по кровле вдоль наклонного ствола шахты 60-летия ВОСР

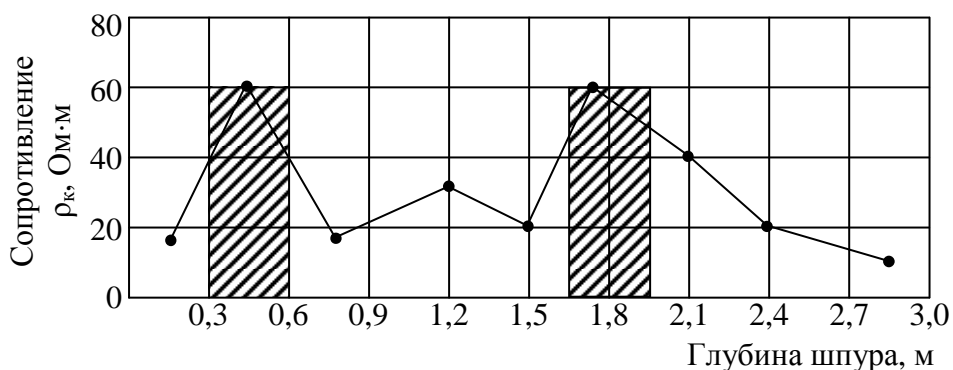


Рис. 2 – Данные электрометрии по шпуру в своде ствола

На рис. 1 даны значения сопротивления (Ом·м) по длине наклонного ствола (фрагмент показан для 200 м). Анализ результатов позволил установить следующую особенность: по длине ствола на каждые 100 м проявляется одна депрессия (аномалия) по величине значения сопротивления. Это участки большего расслоения пород. Анализ данных на рис. 2 показывает другую особенность: вглубь массива отмечается две зоны повышенного сопротивления – одна в пределах 0,4-0,6 м и другая на удалении 1,6-1,9 м от контура выработки. Следовательно, вокруг ствола формируется две круговые аномальные зоны по расслоению пород. По результатам измерений были вычислены коэффициенты трещиноватости породного массива, значения которых приведены в табл. 1. Придерживаясь терминологии согласно [2], такой массив можно рассматривать как связнонарушенный, а по величине коэффициента трещиноватости как содержащий две трещинные зоны, опоясывающие ствол в среднем на удалении 0,5 м и 1,75 м.

Таблица 1 – Изменение коэффициента разрыхления пород в кровле ствола вглубь массива

Номера шпуров	Глубина диагностирования, м							
	0,5	0,7	1,2	1,5	1,7	2,1	2,4	2,8
1	1,16	1,10	1,12	1,11	1,15	1,13	1,09	1,08
2	1,14	1,09	1,11	1,10	1,13	1,11	1,10	1,07
3	1,13	1,08	1,10	1,09	1,14	1,12	1,11	1,08

Резюмируя изложенное можно заключить, что геомеханика разрушения пород над наклонными стволами связана в первую очередь, с расслоением пород в сводовой части выработки. Отсюда вытекает практический вывод: повышение устойчивости стволов может быть достигнуто цементационно-тампонажным упрочнение породного массива. Исходя из этой предпосылки обоснованы параметры тампонажа породного массива вокруг ствола вязкопластическими растворами.

Остановимся на геомеханических и горно-технических аспектах тампонажного упрочнения пород вблизи горной выработки.

Процесс формирования тампонажных завес в горном массиве обусловлен течением тампонажных растворов в трещинах горных пород под действием избыточного давления. Избыточное давление, воздействуя на стенки трещин, вызывает упругие деформации массива, трещины раскрываются и приобретают некоторую клиновидную форму с максимальным раскрытием вблизи нагнетательной скважины и минимальным – на контуре влияния.

Основные параметры гидравлического расчета процесса тампонажа обводненных горных пород – потери давления и радиус распространения раствора при нагнетании его в тампонажную скважину.

Аналитические расчеты параметров процесса тампонажа с учетом упругих деформаций горного массива в некоторых случаях приводят к большим погрешностям. Поэтому целесообразно получить достоверные расчетные уравнения для определения потерь давления и радиусов распространения тампонажного раствора в упругодеформируемой трещиноватой среде.

Течение тампонажного раствора, представляющего собой вязкопластичную жидкость, в трещине подчиняется реологическому закону Шведова – Бингама:

$$\tau_h = \tau_0 + \eta \frac{d_u}{d_n} \quad (1)$$

где τ_h — касательное напряжение на стенке трещины; τ_0 — динамическое напряжение сдвига; η — структурная вязкость; d_u/d_n — градиент скорости.

При радиальном течении тампонажного раствора [3] образуется ядро потока (рис. 3), размеры которого определяются выражением

$$h_0 = h - \sqrt{\frac{Q\eta}{2\pi \cdot r \tau_0}}, \quad (2)$$

где h_0 — размер ядра потока; h — половина раскрытия трещины; Q — расход нагнетания тампонажного раствора; τ_0 — динамическое напряжение сдвига; η — структурная вязкость; r — радиус распространения раствора.

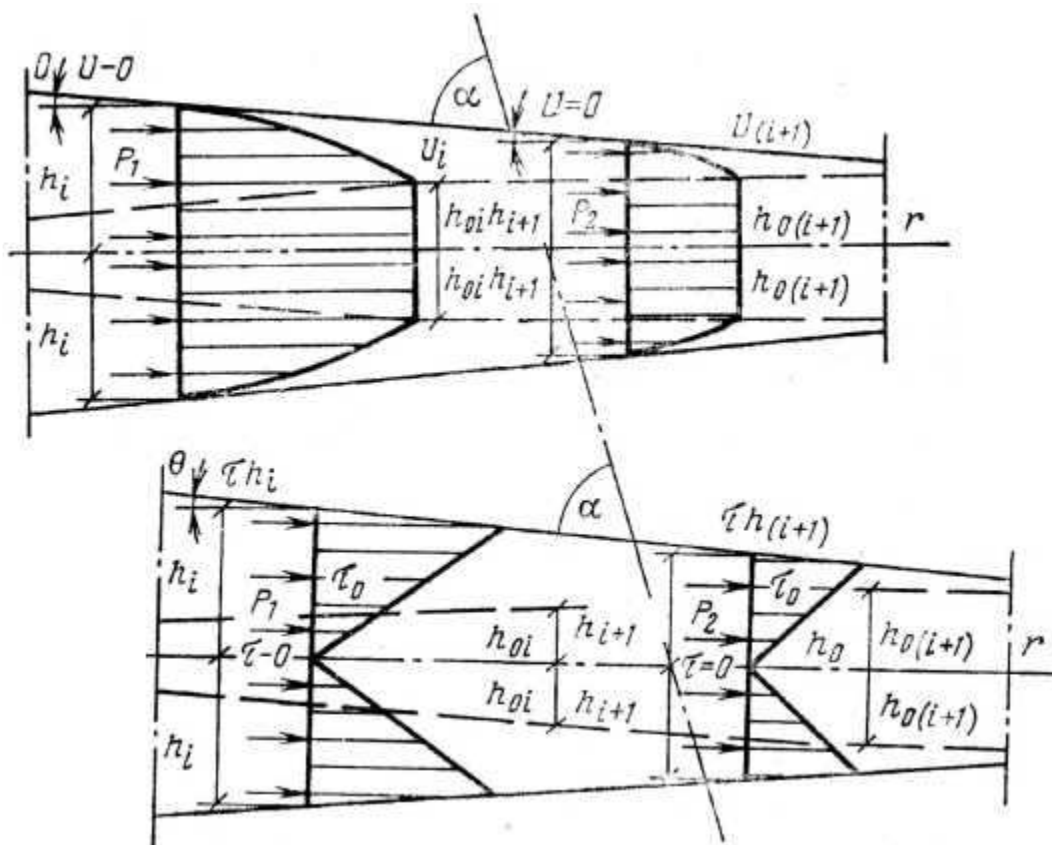


Рис. 3 – Эпюры скоростей и напряжений сдвига при течении тампонажного раствора в трещине с деформируемыми стенками

Из уравнения, полученного Ю.П. Желтовым, следует, что величина раскрытия трещин в процессе нагнетания жидкости в массив не остается постоянной, а зависит от величины избыточного давления:

$$\delta_i = \delta [1 + \beta_i (P - P_0)] \quad (3)$$

$$\beta_i = \beta_c / m_T \quad (4)$$

где δ_i — раскрытие трещины при избыточном давлении; δ — начальное раскрытие трещин; P_0 , P — пластовое давление и давление, создаваемое при нагнетании жидкости; β_i — комплексный параметр трещиноватости, учитывающий упругие свойства горной породы и геометрию систем трещин (трещинную пустотность); β_c — коэффициент объемной упругости горных пород; m_m — трещинная пустотность (скважность).

На основании уравнения Шведова — Бингама (1), эпюры скоростей и напряжений сдвига (рис. 3) и уравнения (3) в общем случае получено дифференциальное уравнение движения тампонажного раствора в упругодеформируемой среде

$$\frac{d_p}{d_r} = \frac{\tau_0}{h[1 + \beta_i(P - P_0)] - \sqrt{\frac{Q\eta}{2\pi \cdot r \tau_0}}} - \rho q g \cos \varphi \cos \alpha \quad (5)$$

где d_p/d_r — градиент давления; r — полярный радиус; α — полярный угол; α — угол наклона плоскости трещины к вертикали (рис. 3). Остальные обозначения прежние.

Интегрирование уравнения (5) с начальным условием

$$P(R_c) = P_c, \quad (6)$$

где R_c — радиус скважины; P_c — давление в скважине при нагнетании раствора, дает выражение для расчета потерь давления при течении тампонажного раствора в упругодеформируемом горном массиве

$$\Delta P = \frac{3Q\eta}{\pi(\delta[1 + \beta_i(P_c - P_0)])^3} \ln \frac{R_k}{R_c} + \frac{2\tau_0(R_k - R_c)}{\delta[1 + \beta_i(P_c - P_0)]} + \frac{8\tau_0(R_k - R_c)\sqrt{Q\eta}}{(\delta[1 + \beta_i(P_c - P_0)])^2 \sqrt{2\pi R_k \tau_0} + \sqrt{2\pi R_c \tau_0}} - \rho \cdot g(R_k - R_c) \cos \varphi \cos \alpha. \quad (7)$$

Для максимального радиуса распространения тампонажного раствора получено уравнение

$$\Delta P = \frac{2\tau_0(R_k - R_c)}{\delta[1 + \beta_i(P_c - P_0)]} - \rho \cdot g(R_k - R_c) \cos \varphi \cos \alpha. \quad (8)$$

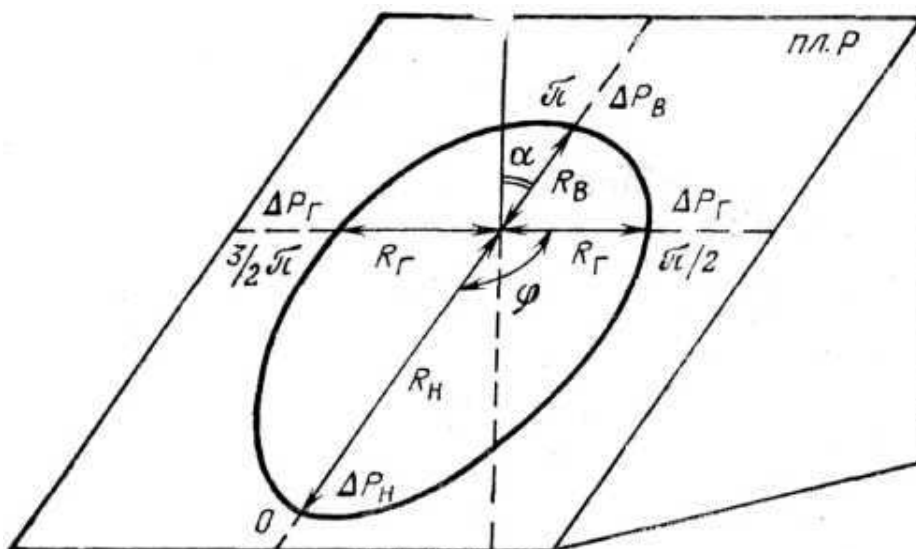


Рис. 4 — Схема для определения радиусов распространения тампонажного раствора в упругодеформируемой среде

Максимальный радиус при достижении перепада давления определяется выражением

$$R_k = \frac{\Delta P \delta [1 + \beta_i (P_c - P_0)]}{2\tau_0 - \delta [1 + \beta_i (P_c - P_0)] \cdot \rho \cdot g \cos \varphi \cos \alpha}. \quad (9)$$

В реальных условиях при нагнетании тампонажного раствора в наклонные трещины [4] наиболее слабым местом в тампонажной завесе будет зона распространения раствора по восстанию трещины, т. е. зона, где полярный угол φ принимает значение, равное α (рис. 4).

Поэтому при определении устойчивости тампонажной оболочки в этой зоне необходимо определять необходимый минимальный радиус завесы, обеспечивающий эту устойчивость. С учетом выражения (9) имеем

$$(R_k)_{\min} = \left(\frac{\Delta P \delta [1 + \beta_i (P_c - P_0)]}{2\tau_0 - \delta [1 + \beta_i (P_c - P_0)] \cdot \rho \cdot g \cos \varphi \cos \alpha} + R_c \right) \geq \frac{\alpha \delta_{\max} P_0}{2[P_T]} + R_c, \quad (10)$$

где $(R_k)_{\min}$ — размер изоляционной завесы в наиболее слабой зоне; α — коэффициент запаса прочности изоляционной завесы; δ_{\max} — максимально наблюдаемое раскрытие трещин на участке; R_c — радиус шахтного ствола в проходке; P_T — допустимая пластическая прочность тампонажного раствора.

Остальные обозначения прежние.

Для обеспечения эффективности предварительного тампонажа горных пород и контроля качества выполнения работ важно знать структуру и размеры сформированных завес [5], которые оцениваются в основном гидродинамическими методами. Кривые восстановления давления (КВД) в этом случае перестраиваются в полулогарифмических координатах и по выделенным прямолинейным участкам определяются коэффициент проницаемости и другие фильтрационные параметры пласта. После нагнетания раствора вокруг скважины формируется тампонажная завеса, размеры которой колеблются от нескольких до десятков метров. Фильтрационная структура завесы неоднородна, а ее изоляционные свойства уменьшаются с увеличением радиуса. В связи с малым временем прохождения через зону ухудшенной проницаемости фронта возмущения не удастся выделить достаточно представительный прямолинейный участок, характеризующий восстановление давления в затампонированной зоне. Предложенная нами методика изучения зональной неоднородности сформированных изоляционных завес основана на использовании интегральных характеристик КВД — детерминированных моментов. Рассмотрим скважину как динамическую систему, которая описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$d_p/d_t + aP = c, \quad (11)$$

где P — изменение давления на устье, соответствующее текущему времени t после остановки скважины, Па. С помощью метода модулирующих функций на интервале времени $[t_0, T]$ для вычисления параметров a и c получим систему алгебраических уравнений. Из уравнения (11) следует, что.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = P_{пл} = ca^{-1}; P(t) = ca^{-1} - P_0 \exp(-at),$$

где $P_{пл}$ — пластовое давление, Па.

Постоянная P_0 определяется методом наименьших квадратов по КВД на интервале $[t_0, T]$. Детерминированные моменты μ_n рассчитываются по формуле

$$\mu_n = \int_0^T [P_{пл} - P(t)] \cdot t^n dt + \int_T^\infty P_0 t^n \exp(-at) dt, \quad (12)$$

где $n=0, 1, 2$.

Для данного временного промежутка диагностический признак $d = \mu_0 \mu_2 (\mu_1)^{-2}$. Вычисляя значения d для различных T , получим диагностическую функцию $d(T)$. Максимальное ее значение d_{max} достигается при $T = t_{max}$. Коэффициент неоднородности $\alpha = 0,17_{exp} (1,2d_{max})$.

Учитывая, что время прохождения фронта возмущения через границу затампированной зоны $t_0 = 0,01\alpha t_{max}$, найдем выражение для радиуса этой зоны

$$R = \frac{r_0}{15} \sqrt{\frac{\alpha \cdot t_{max}}{t^*} \exp\left(\frac{P^*}{tg\beta}\right)}, \quad (13)$$

где r_0 — радиус скважины, м;

t^* и P^* — координаты точки на выделенном прямолинейном участке КВД, соответствующем незатампированной части пласта, с и Па;

$tg\beta$ — тангенс угла наклона прямолинейного участка КВД. Коэффициент проницаемости на границе затампированной зоны рассчитывается по формуле

$$K = q \cdot \mu / (4\pi \cdot \alpha \cdot M tg\beta), \quad (14)$$

где q — производительность насоса, м³/с;

μ — вязкость воды, Па с;

M — мощность горизонта, м.

Предложенная методика позволяет определить фильтрационную неоднородность и размеры сформированной тампонажной завесы. Методика апробирована при выполнении тампонажных работ на ряде объектов шахтного строительства.

Касаясь горнотехнических аспектов регламента цементационно-тампонажного упрочнения пород над стволами нами использованы разработки,

приведенные в работе [6]. В частности рекомендовано:

1) для тампонажа использовать смесь «БИ-крепь», разработанную специалистами ЗАО «Донецксталь», характеризующуюся при твердении высокой прочностью: 1 сут. – 9-12 МПа; 7 сут. – 28 МПа; 28 сут. – 39-45 МПа;

2) в качестве нагнетательных агрегатов целесообразно использовать оборудование типа МОНО WT-820 (0,6 МПа) или машину многоцелевую бетоноукладочную МБМ (до 5 МПа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Булат А.Ф. Методическое пособие по комплексной геофизической диагностике породного массива и подземных геотехнических систем // А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, В.Н. Соколовский / Днепропетровск, ИГТМ НАН Украины, 2004. – 75 с.

2. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.

3. Пшеничный Ю.А. Расчет технологических параметров тампонажа упругодеформируемого горного массива. // Шахтное строительство №2, 1988. – с. 18-19.

4. Кузмичев Д.Н. Уравнение притока мощности из трещиноватого коллектора. Труды ГрозНИИ, вып.Х. Грозный, 1961, с.68-77.

5. Пшеничный Ю.А., Букарев К.П. О зональной фильтрационной неоднородности сформированных изоляционных завес. // Уголь Украины №10, 1986 – с.42.

6. Булат А.Ф. Временный технологический регламент по охране подготовительных выработок угольных шахт литыми полосами из твердеющих материалов // А.Ф. Булат, М.А. Ильяшов, Б.М. Усаченко / Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2004. – 33 с.