

УДК 622.023

**В.А. Курнаков**

## **НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ НАКЛОННЫХ СТВОЛОВ И ИХ ЛИКВИДАЦИИ**

*Выполнен анализ состояния вопроса ликвидации околоствольных целиков и наклонных выработок. Сформулированы новые требования к оценке напряженно-деформированного состояния крепи наклонных стволов. Выполнены аналитические исследования процесса течения растворов и технологий ликвидации наклонных шахтных стволов*

*Ключевые слова: экспериментально-аналитический метод диагностики фактического напряженно-деформированного состояния крепи вертикальных шахтных стволов, ликвидации горных выработок закрываемых шахт, закладки наклонных выработок дисперсными смесями.*

**В** настоящее время большинство работ, связанных с отработкой ограниченных запасов, было ориентировано на исследования, направленные на обоснование технологической очистной выемки целиков под вертикальными шахтными стволами. Значительный вклад в решение многих задач в данной области исследований внесли А.К. Ардашев, А.А. Борисов, А.С. Бурчаков, Н.С. Булычев, М.А. Иофис, Г.А. Катков, В.Н. Каретников, А.М. Козел, В.Н. Корнилов, И.С. Крашкин, Ю.Н. Кузнецов, Г.Г. Литвинский, Э.Э. Нильва, В.А. Потапенко, И.И. Савин, К.Ф. Сапицкий, А.П. Судоплатов, А.В. Стариков, К.Н. Трубецкой, Р.А. Фрумкин, Н.Н. Фотиева, Л.Д. Шевяков, Г.Г. Штумпф, В.Д. Ялевский и многие другие. В комплексе такие исследования начали реализовываться в работах проф. С.Г. Страданченко, В.И. Сарычева, И.И. Савина и доц. М.А. Голодова, в которых была обоснована возможность отработки околоствольных целиков короткозабойными технологиями с пневматической закладкой выработанных пространств. При этом на базе камерных и камерно-

столбовых систем разработки был разработан ряд принципиальных схем ведения очистных работ, заложены основы определения параметров подготовки выемочных участков в пределах околоствольных целиков, учитывающие габариты и конфигурацию околоствольных дворов, размеры охраняемых целиков с учетом ряземеханических свойств углепородного и закладочного массивов, а также получены универсальные уравнения деформаций земной поверхности, адаптированные к искривлениям подрабатываемых шахтных стволов. Был разработан экспериментально-аналитический метод диагностики фактического напряженно-деформированного состояния крепи вертикальных шахтных стволов при их эксплуатации в процессе отработки околоствольных целиков.

С другой стороны, опыт ликвидации горных выработок закрываемых шахт показывает, что практически на каждом объекте возникали геомеханические и гидрогеологические проблемы и осложнения. Анализ существующих способов закладки горных выработок показывает, что одним из

перспективных способов является применение различных высокодисперсных твердеющих материалов с гидравлической подачей, обеспечивающее тампонирующее выработанного пространства и боковых пород. В настоящее время существует множество способов тампонажа для различных геотехнологических ситуаций, которые разработаны отечественными учеными, такими как: И.Г. Айтматов, В.Н. Бондаренко, Ю.В. Бурков, Н.С. Бульчев, И.Н. Вахромеев, П.П. Гальченко, Е.Г. Дуда, Е.П. Калмыков, Э.Я. Кипко, А.П. Максимов, И.А. Насонов, Ю.А. Полозов, М.А. Саламатов, Ю.Н. Спичак, П.С. Сыркин, В.А. Хямяляйнен, М.Н. Шуплик и многими другими.

Для ликвидации наклонных выработок наиболее эффективным тампонажно-закладочным материалов является глиноцементная смесь, включающая в себя добавки и наполнители из промышленных отходов. Глиноцементные растворы составляют основу комплексного метода тампонажа горных пород ГОАО «Спецтампонаж-геология», в разработку которого внесли существенный вклад такие ученые как: Кипко Э.Я., Полозов Ю.А., Спичак Ю.Н., Лагунов В.А., Должиков П.Н., Кипко А.Э., Попов И.В., Попов А.В., Цаплин Е.Г., Дмитриенко В.А., Шубин А.А.

Однако полученные результаты не могут быть в полной мере применены при эксплуатации и ликвидации наклонных стволов в процессе закрытия угольных шахт. Существующие методы прогнозирования и фактической оценки напряженно-деформированного состояния крепи наклонных шахтных стволов при их подработке, а также рекомендации по ликвидации стволов на стадии закрытия горных предприятий требуют существенной доработки, направленной на форми-

рование комплекса обоснованных решений при закрытии угольных шахт. Кроме того, при ликвидации наклонных стволов необходимо использование основных закономерностей течения и структурирования вязкопластических растворов, принципов и технических средств приготовления и нагнетания тампонажных смесей, на основании которых возможно решение аналитических выражений, определяющих закономерности распространения растворов в пустых и засыпанных наклонных выработках, проведение экспериментальной апробации, обоснование свойств раствора и технологических параметров формирования изоляционных перемычек, разработка методики проектирования и технологий закладки наклонных выработок дисперсными смесями.

В процессе отработки конкретного шахтного поля в крепи ствола формируется стационарное напряженное состояние, которое в процессе основного периода эксплуатации месторождения существенно не изменяется. Однако в период погашения предохранительных целиков происходит существенное деформирование околоствольного массива горных пород, а соответственно и самой крепи ствола. Это вызывает необходимость контроля напряженно-деформированного состояния крепи наклонных стволов с целью принятия оперативных геотехнологических решений.

Принципиально, методологически правильно было бы воспользоваться трудами Н.С. Бульчева и И.И. Савина и взять за основу разработанные ими методы расчета и оценки прочности крепи. Однако при расчете и оценке прочности крепи наклонных шахтных стволов возникают определенные трудности, особенности при их подработке. На сегодняшний день

данная проблема не решена ни в отечественной, ни в зарубежной практике. Сложность решения вызывается следующими обстоятельствами (рис. 1).

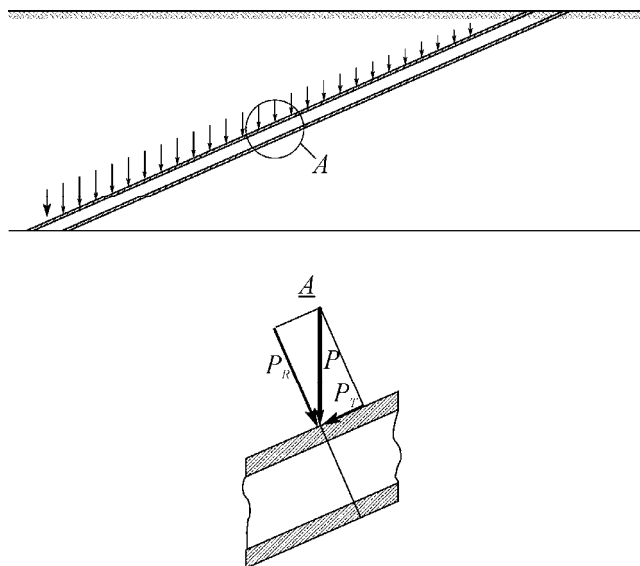
Нагрузка по длине ствола распространяется неравномерно. Однако этот факт принципиальных трудностей не вызывает. Более значимым является тот факт, что нагрузка  $P$  прикладывается не перпендикулярно оси ствола. Метод проф. Бульчева Н.С. предполагает сечение наклонной выработки плоскостью, перпендикулярной оси выработки и разделение силы  $P$  на две составляющие: радиальную  $P_R$  и касательную  $P_T$  и дальнейший расчет производить как для обычной выработки круглого поперечного сечения, нагруженной по внешнему контуру нагрузкой  $P_R$ . На наш взгляд, такое разделение нагрузок совершенно не учитывает влияние касательной нагрузки  $P_T$  и, соответственно, возникновение осевых напряжений в крепи ствола. Однако, данные напряжения, особенно при подработке ствола, могут достигать значительных величин. Исходя из отмеченного, следуют два основных вывода.

Во-первых, при оценке прочности крепи необходимо рассматривать ее прочность не только в сечении перпендикулярном оси ствола, но и осевом сечении ствола.

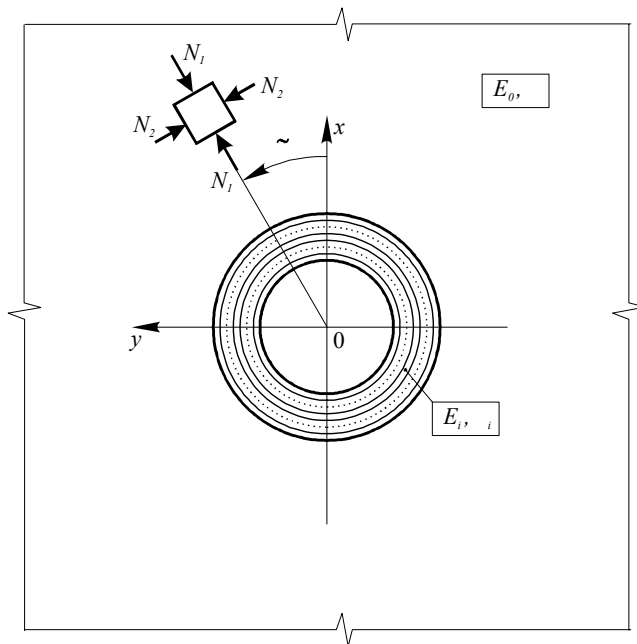
Во-вторых, в процессе ликвидации горного предприятия необходимо осуществлять постоянный мониторинг за напряженно-деформированным состоянием ствола. Причем, в отличие от проф. И.И. Савина, обработку результа-

тов натуральных экспериментов следует производить с учетом не только радиальных и тангенциальных датчиков, но и с учетом датчиков, расположенных в осевом направлении ствола.

Результаты расчета крепи наклонных шахтных стволов (в общем случае многослойной) с использованием схемы контактного взаимодействия крепи и массива пород существенно зависят от характеристик начального расчетного поля напряжений, являющихся основной частью исходных данных. Для современных методов расчета, базирующихся на методах математической теории упругости, такими исходными данными являются величина главного расчетного напряжения  $P_b$ , коэффициент неравномерности распределения нагрузок  $\xi$  и угол наклона главных осей начальных напряжений к вертикали и горизонтали  $\tilde{\alpha}$ . Применительно к наклонным шахтным стволам величина  $P_b = \alpha * \lambda \gamma H$  для гравитационного поля начальных напряжений ( $\alpha^*$  –



**Рис. 1. Принципиальная схема нагружения крепи наклонного ствола**



**Рис. 2. Расчетная схема многослойной крепи применительно к тектоническому полю начальных напряжений**

корректирующий множитель, учитывающий отставание возведения крепи от забоя и несовершенства расчетной схемы;  $\lambda$  – коэффициент бокового давления;  $\gamma$  – удельный вес пород;  $H$  – глубина заложения расчетного сечения ствола),  $\xi = 1$ ; для тектонического поля начальных напряжений (рис. 2)  $P_b = \alpha * N_1$ ,  $\xi = N_2 / N_1$  ( $N_1$  и  $N_2$  – величины главных начальных напряжений, причем  $N_1 > N_2$ ).

Качественная и количественная к-ного состояния крепи в основном зависит от указанных выше величин. Однако, получение достоверной информации о характеристиках начального поля напряжений часто бывает затруднено. Так, если для гравитационного поля начальных напряжений установить указанные характеристики не представляет особого труда, то

для расчета крепи в массиве, подверженном действию тектонических сил, соответствующие характеристики можно определить лишь в результате натурных измерений (метод разгрузки, метод компенсационной нагрузки, метод разности давлений, метод буровых скважин и др.). Однако даже в этом случае использование полученных результатов для расчета крепи с заданной надежностью часто не является приемлемым, поскольку для расчета крепи требуются некоторые обобщенные значения  $P_b, \xi$ , и  $\tilde{\alpha}$ , характерные для окружающего ствол массива в целом, а не случайные их реализации в отдельных точках массива.

Еще больше возникают трудности в том случае, когда речь идет о выработках на подрабатываемых территориях, когда распределение напряжений вокруг них достоверно не описываются не одной из известных гипотез.

Указанные трудности послужили причиной развития методов расчета крепи, базирующихся на обработке измеренных в натуральных условиях нагрузок, что является особенно актуальным при проектировании, строительстве и эксплуатации стволов в тектонически активных районах, и особенно стволов ликвидируемых шахт.

Среди методов получения информации о фактическом поле напряжений в массиве пород вокруг строящихся и эксплуатируемых выработок следует выделить группу экспериментально-аналитических методов. Применительно к наклонным стволам

наиболее перспективными представляются методы, базирующиеся на аналитическом решении плоской контактной задачи теории упругости для среды, моделирующей массив пород, ослабленной круглым отверстием, подкрепленным неоднородным (многослойным) кольцом, моделирующим крепь, имеющей начальные напряжения, обусловленные действием гравитационных или тектонических сил, а также сил в области деформирующегося массива пород. Задача ставится, как обратная и состоит в определении характеристик поля напряжений по результатам измерения контактных напряжений, деформаций или смещений в произвольных точках крепи. Общий путь решения обратных задач для определения начального напряженного состояния массива пород предложен С. Н. Поповым и в дальнейшем был разработан в трудах Н.Н. Фотиевой для выработок некругового поперечного сечения и Н.С. Бульчева и И.И. Савина для многослойных крепей выработок круглого поперечного сечения. В данной работе предлагается использовать полученные решения для оценки напряженно-деформированного состояния крепи наклонных стволов ликвидируемых шахт, что на сегодняшний день не производилось.

Исходя из назначения, условий эксплуатации и тех положений, что были высказаны выше, можно сделать следующие выводы.

1. При строительстве наклонного ствола он не был оснащен какой-либо системой измерений. В этом случае, для оценки прочности крепи необходимо воспользоваться каким-либо известным методом. В данной работе предлагается использовать метод разгрузки, предложенный отечественными учеными (метод ВНИМИ), который хорошо зарекомендовал себя, в частности при оценке прочности крепи

вертикальных шахтных стволов. В этом случае задача существенно упрощается при использовании современной измерительной техники, например отечественной фирмы «Авангард» (г. Санкт-Петербург).

2. При строительстве наклонного ствола он был оснащен системой измерений, позволяющей осуществлять измерение какого-либо одного из компонентов напряжений или деформаций. Как правило, у нас в стране наибольшее распространение получили измерения нагрузок на крепь с помощью динамометров различных конструкций или измерения нормальных тангенциальных напряжений с помощью закладных деформометров типа ПЛДС.

3. При строительстве наклонного ствола он был оснащен системой измерений, позволяющей осуществлять совместное измерение нескольких компонентов напряжений или деформаций. Такие измерительные станции являются наиболее современными и в основном применяются в новых горных выработках различного назначения.

На основании исследований процесса течения растворов и технологий ликвидации наклонных шахтных стволов установлено, что поскольку заполнение выработанного пространства осуществляется крупноблочным материалом из горелой породы, то объемная структура такого закладочного массива включает разнородные каналы и пустоты, отличающиеся размерами и частотой распространения. Остаточная пустотность и проницаемость анизотропной среды заполнения имеют характер нестационарных случайных функций. Так как для практических расчетов при аппроксимации графиков распределения пустотности наиболее часто используется корреляционная функция экс-

поненциального вида, то это позволило предложить модель тампонажа пород засыпки стволов путем введения изотропирующего параметра – среднего раскрытия каналов фильтрации вязкопластического раствора  $\bar{\delta}$ . В результате установлена взаимосвязь среднего значения пустотности с раскрытием фильтрационных каналов:

$$\bar{\delta}_i = (\alpha_c + 1) \frac{\bar{n}_i V_g}{N_{ki} a R},$$

где  $\bar{\delta}_i$  – среднее раскрытие фильтрационных каналов на  $i$ -м участке;  $\bar{n}_i$  – средняя пустотность пород засыпки на  $i$ -м участке;  $a_c$  – коэффициент сжимаемости пород засыпки;  $N_{ki}$  – число фильтрационных каналов на  $i$ -м участке;  $V_g$  – объем выработки;  $a$  – ширина выработки;  $R$  – радиус пространства раствора.

В зависимости от горнотехнического состояния и угла наклона выработки, ее параметров и свойств тампонажного раствора заполнение пространства происходит в двух различных режимах – безнапорном и напорном. При безнапорном течении вязкопластического раствора на почве горной выработки образуется слой, толщина которого зависит от динамического напряжения сдвига раствора, его плотности, угла наклона выработки. В результате порционного нагнетания раствора пустота в выработке заполняется послойно в безнапорном режиме, а на заключительной стадии – в напорном.

В соответствии с моделью тампонажа процесс течения вязкопластического раствора в среде засыпки описывается общим уравнением движения:

$$K_x - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \frac{\eta}{\rho} \frac{d^2 V_x}{dy^2} = 0,$$

решение которого при граничных условиях

$$V_x \Big|_{y=\frac{\bar{\delta}}{2}} = 0 \text{ и } \frac{dV_x}{dy} \Big|_{y=\frac{\bar{\delta}_0}{2}} = 0$$

позволило получить зависимость перепада давления  $\Delta P$  при перемещении раствора на расстояние  $R$ :

$$\Delta P = \frac{2\tau_0 N_k a}{(1 + \alpha_c) S_0} \int_0^R \frac{dx}{n(x)} - \rho g R \sin \varphi,$$

где  $\tau_0$  – динамическое напряжение сдвига раствора;  $\rho$  – плотность раствора;  $\eta$  – вязкость раствора;  $S_0$  – сечение выработки;  $n(x)$  – функция распределения пустотности;  $K_x = \rho g \sin \varphi$  – вектор массовых сил;  $\varphi$  – угол наклона выработки.

В том случае, если выработка находится в сложном горнотехническом состоянии и не может быть засыпана, для успешной и экономически эффективной ее ликвидации на нижней границе ее заполнения формируется изоляционная перемычка из глиноцементного раствора с наполнителем через скважину, пробуренную с поверхности. Изоляционная перемычка формируется в два этапа: создание конической «опорной» подушки и порционное нагнетание раствора. Первая фаза – безнапорный режим, вторая – напорный. При этом основным критерием качества формирования и устойчивости перемычки будет площадь ее контакта с кровлей, которая находится из выражения:

$$S_0 = \frac{2\pi\tau_0 h_m^2 \Delta P^2}{\sqrt{(4\tau_0^2 - h_m^2 \rho^2 g^2 \sin^2 \varphi)^3}},$$

где  $h_m$  – высота конуса течения.

Для определения геометрических параметров перемычки и объемов нагнетания раствора в зависимости от

свойств раствора, сечения и угла наклона выработки, давления нагнетания и массовых сил вышерасположенного тампонажного материала получен ряд аналитических зависимостей. Объем тампонажного раствора рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{\alpha_c \pi H a}{6 \cos \varphi} \left( \frac{R_g + R_n + R_{\text{вк}} + R_{\text{нк}} + \sqrt{(R_g + R_n)(R_{\text{вк}} + R_{\text{нк}})}}{1} \right),$$

где  $H$  – высота выработки;  $R_g$  и  $R_n$  – размеры основания перемычки по восстанию и падению;  $R_{\text{вк}}$  и  $R_{\text{нк}}$  – радиусы контакта раствора с кровлей по восстанию и падению выработки.

Изоляционная перемычка будет устойчива при воздействии массовых сил в случае выполнения условия

$$\frac{\pi a P_m}{2} \left( R_{\text{вк}} + R_{\text{нк}} + \frac{2L}{\pi} \right) > \rho g S L_T \sin \varphi,$$

где  $P_m$  – пластическая прочность раствора;  $L_T$  – длина участка ликвидации выработки;  $L$  – расстояние между тампонажными скважинами.

Для заполнения выработанных пространств больших объемов при ликвидации наклонных выработок целесообразно применение безусадочных и дешевых тампонажно-закладочных материалов на базе отходов промышленного производства.

Исходя из физико-химических процессов контактных взаимодей-

ствий для неглинистых пород при их дисперсности, близкой к глинистой фракции, установлены основные критерии пригодности отходов для получения стабильных водных суспензий. При этом за исходные параметры принимаются: плотность твердой фазы, когезионная прочность породы и число пластичности. Доказано, что стабилизация водных суспензий, не удовлетворяющих условиям по дисперсности или минералогическому составу, может быть достигнута введением глинистого раствора. По условию равновесия твердых частиц отходов в глинистом растворе получена зависимость допустимого содержания отходов от исходной плотности глинистого раствора:

$$n_n = \frac{\gamma - \gamma_2}{\rho_n - \gamma},$$

где  $\gamma$  – плотность смеси;  $\rho_n$  – плотность отходов;  $\gamma_2$  – плотность глинистого раствора.

Таким образом, выполненные исследования позволили создать теоретические предпосылки для проведения экспериментальных исследований и разработки методики процесса ликвидации наклонных шахтных стволов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курнаков В.А. Исследование процесса безнапорного заполнения наклонной выработки тампонажным раствором // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. –

2003. – Прил. № 4. Научно-технические проблемы шахтного и подземного строительства. – С. 141–143.

ГИАБ

### Коротко об авторе

Курнаков В.А. – доцент, кандидат технических наук, Московский государственный горный университет, Шахтинский институт (филиал) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» siurgtu@siurgtu.ru

