

Харисов Тимур Фаритович

младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620219, Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
Тел. (343) 350-60-23,
e-mail: timur-ne@mail.ru

Kharisov Timur Faritovich

Junior Researcher
The Institute of Mining UB RAS
620219, Yekaterinburg, 58,
Mamin-Sibiryak st.
Tel. (343) 350-60-23,
e-mail: timur-ne@mail.ru

Антонов Владимир Александрович

главный научный сотрудник,
доктор технических наук,
Институт горного дела УрО РАН,
620219, Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
Тел. (343) 350-37-09,
e-mail: antonov@igduran.ru

Antonov Vladimir Aleksandrovich

Chief Researcher
Doctor of Technical Sciences
The Institute of Mining UB RAS
620219, Yekaterinburg, 58,
Mamin-Sibiryak st.
Tel. (343) 350-37-09,
e-mail: antonov@igduran.ru

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
КРЕПИ В ПРОЦЕССЕ
СТРОИТЕЛЬСТВА
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ**

**PROVISION SUPPORT STABILITY IN
THE PROCESS OF VERTICAL SHAFT
SINKING**

Аннотация:

По результатам экспериментальных измерений деформации горных пород, окружающих вертикальный ствол шахты, выявлена регрессионная закономерность ее изменения в связи с углублением забоя ствола. Дано теоретическое толкование закономерности, исходя из пластично-упругих свойств горного массива. Приведены практические выводы и рекомендации.

Ключевые слова: ствол шахты, углубка забоя, горный массив, деформация, регрессия

Abstract:

According to the results of experimental measurements of rock's deformation surrounding the mine's vertical shaft, regression regularity of its change in connection with deepening the shaft's face is revealed. The theoretical interpretation of the regularity in terms of rock mass plastic-elastic properties is given. Practical conclusions and recommendations are presented.

Key words: mine's shaft, face deepening, rock mass, deformation, regression

По мере проходки и углубки вертикальных стволов напряжение массива окружающих горных пород повышается, что может приводить к искривлению их контуров, потере проектного сечения, а также возникновению опасных для рабочих вывалов и выбросов породы. Выполнение соответствующих ремонтных работ требует значительных финансовых и временных затрат. Поэтому обеспечение устойчивости крепи вертикальных стволов, а следовательно, и безопасности в процессе их строительства представляется актуальным и важным.

Крепи стволов находятся под воздействием гравитационных и тектонических напряжений, которые зависят от геологического строения окружающего массива горных пород и их физико-механических свойств. Основным фактором, определяющим характер нарастания горизонтальных напряжений при углубке забоя шахты, является деформация горного массива как сплошной пластично-упругой среды, вызванная разгрузкой, т. е. разуплотнением в контуре ствола. В работе [1], посвященной экспериментальным деформационным исследованиям, показано, что крепь ствола нагружается по его периметру неравномерно из-за разного действия дополнительных факторов. К ним относятся подвижки консолидированных блоков окружающих горных пород, вли-

яние их анизотропной структуры, наличие локальных зон трещиноватости и обводнения. Установлено, что по мере удаления от забоя минимальные и максимальные значения горизонтальной деформации крепи возрастают с постепенным переходом к стабильному состоянию. Однако до настоящего времени это явление теоретически не объяснено. Его становление и развитие не отражено количественными характеристиками и функциональной закономерностью. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований, восполняющие отмеченный недостаток.

Горизонтальная деформация U сплошной среды горных пород, окружающих ствол шахты, зависит в основном от их пластичных и упругих свойств, расстояния H по вертикали до забоя и диаметра D ствола. Представим деформацию и расстояние до забоя в относительном виде, соответственно, $u = U/D$ и $h = H/D$. Составим уравнение, связывающее отмеченные величины в стационарном, т.е. установившемся по результатам деформации, состоянии горных пород. Действие фактора пластической деформации выражается дифференциальным соотношением $du_{\text{п}} = k_{\text{п}} dh$, где $k_{\text{п}}$ – коэффициент, характеризующий свойства пластичного сдвижения горных пород. Обратное действие фактора упругой сдвиговой деформации выразим соотношением $du_{\text{у}} = -udh/\lambda$, где λ – относительная длина вертикальной релаксации упругого напряжения. Суммарное действие факторов описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$du = k_{\text{п}} dh - \frac{udh}{\lambda}.$$

Интегрируя данное уравнение при граничном условии $u_{h=0}=0$, получим теоретическую зависимость $u(h)$ в общем виде.

$$u(h) = u_{\infty} (1 - e^{-\frac{h}{\lambda}}), \quad (1)$$

где $u_{\infty} = k_{\text{п}} \lambda$ – сбалансированная относительная деформация горной породы.

Экспериментальная проверка теоретической зависимости $u(h)$ и количественная оценка соответствующих коэффициентов u_{∞} , λ проведена по результатам мониторинговых измерений напряженно-деформированного состояния крепи и окружающего массива горных пород на шахтах «Центральная» («ДНК») и «Молодежная» Донского горно-обогатительного комбината. Массив сложен ультраосновными породами силурийского возраста, представленными перидотитами, пироксеновыми и серпентинизированными дунитами. Тектонические нарушения массива сопровождаются опережающими более мелкими зонами трещиноватости, что определяет его блоковое строение. Каждый блок в свою очередь разбит сетью разно ориентированных микротрещин.

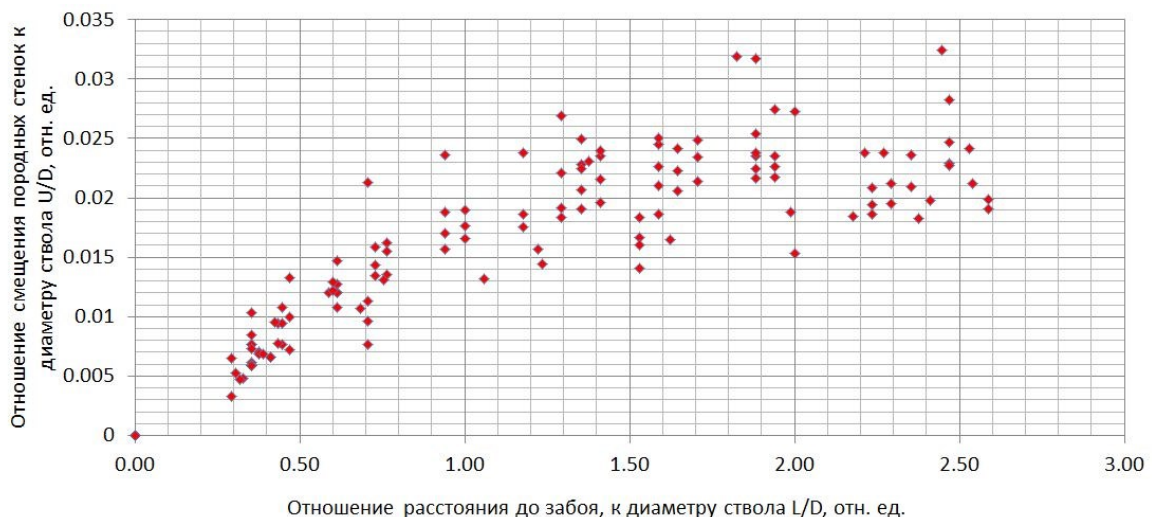


Рис. 1 – Относительное смещение породных стенок вблизи забоя в процессе проходки ствола «ДНК»

Измерение деформаций тубинговой и бетонной крепи, а также породных стенок массива выполнялись методом больших баз и методом щелевой разгрузки. Измерения проводились в равномерно распределенных точках по периметрам окружностей ствола, находящихся на разных фиксированных расстояниях от его забоя. При углублении забоя одним и тем же фиксированным расстоянием соответствовали так же смещенные периметры. На рис. 1 представлены результаты измерений деформации окружающего массива вблизи забоя в процессе проходки ствола «ДНК». Измерения деформации, зарегистрированные на периметрах при фиксированном расстоянии от забоя, усреднены. Они отображают действие основного фактора пластично-упругих свойств окружающего горного массива и являются значимыми для данного эксперимента. Отклонения зарегистрированной деформации от средних значений объясняются действием упомянутых выше дополнительных факторов, которые при поиске зависимости $u(h)$ являются незначимыми. Поэтому такие отклонения деформации воспринимаются как случайные и совместно с погрешностью измерений характеризуются средним квадратичным значением $\sigma_u=0,0018$. Распределение точек средних значений относительной деформации и интервалов ее случайных отклонений σ_u показано на рис. 2.

По результатам экспериментальных измерений деформации построена ее нелинейная функционально-факторная регрессия, методология которой описана в работе [2]. Предварительно оценен допустимый интервал значений коэффициента детерминации R^2 искомой регрессионной модели, в котором она с вероятностью 0,95 должна быть адекватна распределению закономерной и случайной компонент в результатах

измерений. По формулам $R_n^2 = 1 - \frac{f\sigma_u^2}{\chi_{\alpha_1, f}^2 D_u}$ и $R_b^2 = 1 - \frac{f\sigma_u^2}{\chi_{\alpha_2, f}^2 D_u}$ рассчитаны

граничные значения интервала: нижнее $R_n^2=0,8925$ и верхнее $R_b^2=0,9364$. Здесь обозначено: f – число степеней свободы; $\chi_{\alpha_1, f}^2$ и $\chi_{\alpha_2, f}^2$ – процентные точки распределения Пирсона на соответствующих уровнях $\alpha_1=0,025$ и $\alpha_2=0,975$; D_u – дисперсия средних значений относительной деформации. Исходное выражение регрессии принято в виде уравнения (1). Его коэффициенты оптимизированы по данным экспериментальных измерений (точки на рис.1). Соответствующий расчет проведен с помощью компьютерной программы построения функционально-факторных уравнений нелинейной регрессии с самоопределяющимися параметрами и повышенной достоверностью «Тренды ФСП-1». В результате получена следующая математическая модель зависимости $u(h)$:

$$u(h) = 0,0267(1 - e^{-\frac{h}{1,0272}}). \quad (2)$$

Коэффициент ее детерминации $R^2=0,9238$ удовлетворяет заданному интервалу адекватности, а среднее квадратичное отклонение точек экспериментально измеренной деформации от построенной регрессии $\sigma_{\text{рег}}=0,0017$ почти совпадает с приведенной выше оценкой σ_u . Это означает, что отклонения $\sigma_{\text{рег}}$ с вероятностью 0,95 объясняются погрешностью измерения и влиянием незначимых факторов, т.е. структурных неучтенных неоднородностей геологической среды локального действия. Следовательно, данной моделью отображена закономерность вертикального распределения горизонтальной относительной деформации окружающего массива, возникающей при уходке забоя вертикального ствола. Ее график показан на рис. 2.

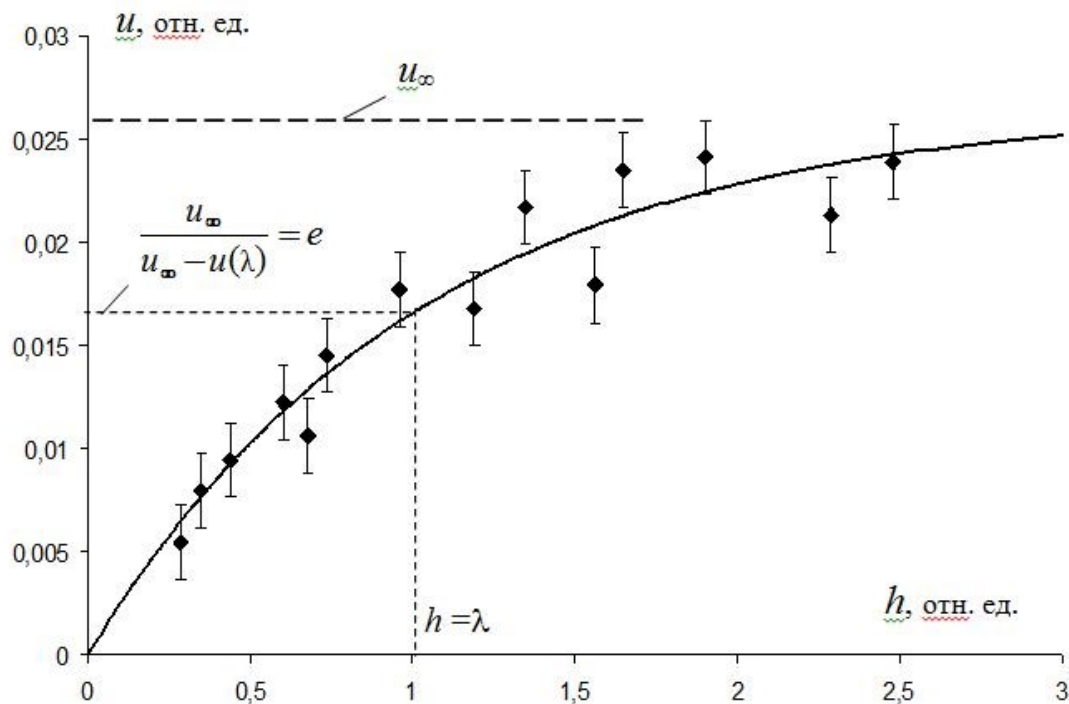


Рис. 2 – Распределение средней относительной деформации горного массива и график ее функционально-факторной регрессии

Отметим некоторые особенности выявленной закономерности (2). Крутизна нарастания деформации по вертикали ствола определяется относительной длиной релаксации λ . Чем больше ее значение, тем меньше крутизна, т.е. график зависимости $u(h)$ становится более пологим. В нашем исследовании для ультраосновных пород получено значение $\lambda=1,0272$. Также получено значение сбалансированной относительной деформации $u_{\infty}=0,0257$. Оно достигается при удалении от забоя на расстояние, намного превышающее длину λ . Непосредственно длина релаксации λ равна расстоянию от забоя, при котором разность $u_{\infty} - u(\lambda)$ меньше u_{∞} в e раз, где e – основание натурального логарифма. Данная интерпретация длины λ отмечена на рис. 2. Вблизи забоя ствола при условии $h \ll \lambda$ деформация окружающего горного массива обусловлена преимущественным влиянием его пластических свойств. Горные породы, вследствие сжимающих напряжений, смещаются в направлении центра ствола. Из выражения (2) в этом интервале следует линейная зависимость $u(h) = u_{\infty} h / \lambda$. По мере увеличения относительного расстояния h нарастает компенсирующее влияние упругой сдвиговой деформации горного массива. Зависимость $u(h)$ переходит от линейной стадии к сбалансированному состоянию. Уже на отметке $h = 3\lambda$ отношение $u(h) / u_{\infty}$ составляет 0,95.

Относительные значения деформационных величин u , h , λ переводятся в соответствующие абсолютные значения U , H , L путем умножения их на диаметр ствола D . Экспериментальные исследования проводились на стволе с размером $D=8,5$ м. Здесь длина релаксации и сбалансированная деформация оцениваются значениями: $L=8,73$ м, $U_{\infty}=0,22$ м. Вблизи забоя ствола, в интервале $0 < H < 4$ м, функция деформации $U(H)$ хорошо аппроксимируется линейной зависимостью $U(H) = 0,025H$. При увеличении H эта зависимость утрачивается. Функция $U(H)$ переходит к сбалансированному состоянию. Оно практически формируется на расстоянии $H > 26$ м ($h > 3\lambda$), где значения $U(H)$ и U_{∞} почти не отличаются.

Проведенные исследования приводят к следующим практическим выводам и рекомендациям. Поскольку деформации массива, вызванные уходом забоя, влекут за собой нарушение целостности крепи, необходимо возводить постоянную крепь после реализации большей доли деформаций, не нарушая при этом технологическую схему строительства ствола, которая была выбрана при проектировании. Реализация большей части деформации возможна за счет применения опережающей разгрузки окружающего массива в виде пилотной выработки меньшего диаметра и глубиной, равной длине релаксации λ . Кроме того, в качестве тампонажного раствора для тубинговой крепи следует применять податливый материал, например, керамзитобетон. Его сжатие обеспечивается пористой структурой и происходит без потери прочностных свойств. При этом начальная толщина керамзитобетона должна выбираться с учетом уменьшения объема из-за максимально возможной деформации горного массива. Максимальное значение случайной деформации с вероятностью 0,99 составляет $3\sigma_{\text{рег}}$. Поэтому максимальная деформация в интервале $h \leq 3\lambda$ оценивается нарастающей функцией $u(h) + 3\sigma_{\text{рег}}$, а в интервале $h > 3\lambda$ сбалансированной суммой $u_{\infty} + 3\sigma_{\text{рег}}$.

Пилотная выработка проходится до возведения постоянной крепи, путем взрывания врубовых шпуров, глубина которых должна быть не меньше длины релаксации λ . Оставшуюся долю деформации массива воспринимает на себя уплотняющийся керамзитобетон, предохраня тем самым крепь от разрушения.

Литература

1. Рыбак С.А. Особенности строительства и крепления вертикальных стволов в тектонически напряженном горном массиве / С.А. Рыбак // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 5. – С. 200 – 206.
2. Антонов В.А. Отображение горно-технологических закономерностей функционально-факторными уравнениями нелинейной регрессии / В.А. Антонов, М.В. Яковлев // Проблемы недропользования. Отд. вып. Горного информационно-аналитического бюллетеня. ОВ11 / ИГД УрО РАН. – М.: Горная книга, 2011. – С. 571 – 588.