© Т.Ф. Харисов, В.А. Антонов, 2015

УДК 622.83

Т.Ф. Харисов, В.А. Антонов

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ПРОХОДКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА

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.

По мере проходки и углубке 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 исследование деформации горных пород и связанной с ней устойчивости крепи вертикальных стволов 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, влияние 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 отображено 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 $du_п = k_п dh$, где

$k_п$ – коэффициент, характеризующий свойства пластичного сдвижения горных пород. Обратное действие фактора упругой сдвиговой деформации выразим соотношением $du_у = -udh/\lambda$, где λ – относительная длина вертикальной релаксации упругого напряжения. Суммарное действие факторов описывается следующим дифференциальным уравнением

$$du = k_П dh - \frac{udh}{\lambda}.$$

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

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

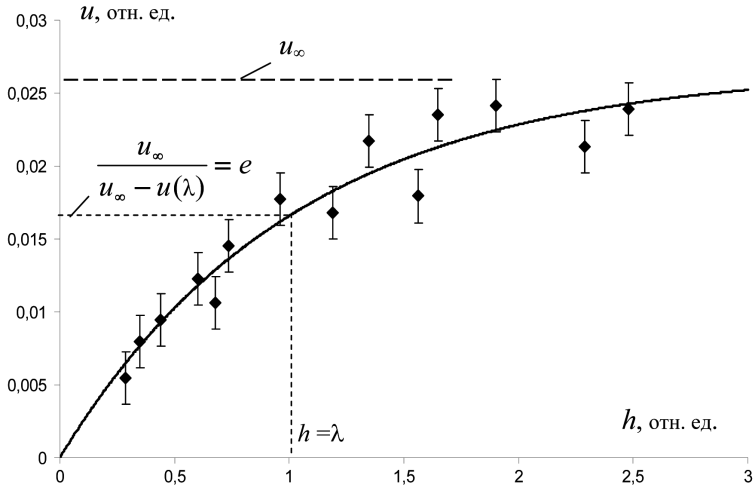
где $u_\infty = k_п\lambda$ – сбалансированная относительная деформация горной породы.

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 оперяющими более мелкими зонами трещиноватости, что определяет его блоковое строение. Каждый блок в свою очередь разбит сетью разно ориентированных микротрещин. Измерение деформаций тюбинговой 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 расстояниям соответствовали так же смещенные периметры. 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 рисунке.

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

$$R_н^2 = 1 - \frac{f\sigma_u^2}{\chi_{\alpha 1,f}^2 D_u} \quad \text{и} \quad R_в^2 = 1 - \frac{f\sigma_u^2}{\chi_{\alpha 2,f}^2 D_u}$$

рассчитаны граничные значения интервала: нижнее $R^2_н = 0{,}8925$ и верхнее $R^2_в = 0{,}9364$. Здесь обозначено: f – число степеней свободы; $\chi^2_{\alpha 1,f}$ и $\chi^2_{\alpha 2,f}$ – процентные точки распределения Пирсона на соответствующих



Распределение измерений относительной деформации горного массива и график ее функционально-факторной регрессии

уровнях α_1 = 0,025 и α_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 рисунке). 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 $u(h)$

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

Коэффициент ее детерминации R^2 = 0,9238 удовлетворяет заданному интервалу адекватности, а среднее квадратичное отклонение точек экспериментально измеренной деформации от построенной регрессии $\sigma_{рег.}$ = 0,0017 почти совпадает с приведенной выше оценкой σ_u. Это означает, что отклонения $\sigma_{рег.}$ 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 рисунке.

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 λ = 1,0272. Так же получено значение сбалансированной относительной деформации u_∞ = 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 рисунке. Вблизи забоя ствола при условии $h << \lambda$ 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 $u(h) = u_\infty \cdot h/\lambda$. 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.

На основании проведенных исследований перейдем 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 тюбинговой 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 $3\sigma_{per}$. Поэтому максимальная деформация в интервале $h \cdot 3\lambda$ оценивается нарастающей функцией $u(h) + 3\sigma_{per}$, а в интервале $h > 3\lambda$ – сбалансированной суммой $u_\infty + 3\sigma_{per}$.

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, предохраняя тем самым крепь от разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рыбак С.А.* Особенности строительства и крепления вертикальных стволов в тектонически напряженном горном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 5. – С. 200– 206.

2. *Антонов В.А., Яковлев М.В.* Отображение горно-технологических закономерностей функционально факторными уравнениями нелинейной регрессии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – ОВ. Проблемы недропользования. – 2011. – С. 571–588. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Антонов Владимир Александрович – доктор технических наук,
главный научный сотрудник, e-mail: antonov@igduran.ru,
Харисов Тимур Фаритович – младший научный сотрудник, e-mail: Timurne@mail.ru,
Институт горного дела УрО РАН.

UDC 622.83

STUDY OF THE DEFORMATION OF ROCKS IN THE PROCESS OF VERTICAL SHAFT SINKING

Antonov V.A., Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, e-mail: antonov@igduran.ru,
Kharisov T.F., Junior Researcher, e-mail: Timurne@mail.ru,
Institute of Mining of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 620219, Ekaterinburg, Russia.

The results of experimental measurements of deformation of rocks surrounding the vertical shaft, regression revealed regularity of its change in connection with the deepening of the bottom of the barrel. The theoretical interpretation of the patterns on the basis of plastic-elastic properties of rock mass. The practical conclusions and recommendations.

Key words: the mining, construction slaughter, mountain range, deformation, regression.

REFERENCES

1. Rybak S.A. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2008, no 5, pp. 200–206.
2. Antonov V.A., Yakovlev M.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. Special issue: Problemy nedropol'zovaniya (Issues of subsoil use), 2011, pp. 571–588.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (ПРЕПРИНТ)

ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ ИМИ КУРСА ФИЗИКИ

Харахан Марк Леонидович – кандидат физико-математических наук, профессор, доцент,
МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

Рассмотрены фундаментальные физические понятия и их роль в построении любого научного исследования, последовательность этапов решения поставленной задачи: понятие модели и понятия физического состояния, закона движения, уравнения движения, принципов соответствия и принципов построения научного предвидения; рассмотрены относительность понятий большого и малого, роль безразмерного параметра при моделировании процессов, соотношение теории и физического эксперимента (прямого и косвенного) и важность соответствия физического закона его области применимости; подчеркнута роль математики как языка, объединяющего все естественные дисциплины.

Ключевые слова: естественнонаучный, модель, постановка задачи, уравнение движения, закон движения, предсказание, область применимости, принцип соответствия, математика как язык физики.

SCIENCE EDUCATION STUDENTS TECHNICAL WU-CALLING IN THE PROCESS OF STUDY OF THEIR PHYSICS COURSE

Kharakhan M.L., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Assistant Professor,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», e-mail: ud@msmu.ru.

In modern society the task of creation of new and modernization of existing respective domestic industries, which must be able to successfully competition to illustrate on the world market. This task can be solved frames only those engineers that have formed the modern style of the scientific and technical thinking. Draw-ke these frames decisive role can and should play a fundamental natural-scientific training. Such training needs to be conducted without a statement of fundamental laws in the introductory sections of special disciplines, and should be used to courses natural Sciences, and, in the first place, the General physics course, be studied within which begins in the first year. The article discussed the application of fundamental physical concepts and their role in the construction of any scientific study of the sequence of stages of solving the problem (and not just physical mechanics and other branches of physics): the concept of models and concepts of the physical state, the law of motion, equations of motion, principles of compliance and the principles of scientific prediction; also considered the relativity of the concept of enterprises large and small, the role of a dimensionless parameter when modeling processes, the relationship of theory and physical experiments (direct and indirect) and the importance of conformity with a physical law of its region of applicability; highlighted the crucial role of mathematics as a language that combines all the natural discipline.

Key words: science, model, problem formulation, the equation of motion of the manifestation, the law of motion prediction, the range of applicability of the principle of conformity, mathematics as the language of physics.