



Л. М. Васильев /д. т. н./, Д. Л. Васильев /к. т. н./,  
Р. Н. Наривский, А. В. Пазынич  
ИГТМ НАН Украины  
А. А. Ангеловский /к. т. н./  
ПАО «Краснодонуголь»

Н. Г. Малич /к. т. н./  
Национальная металлургическая академия  
Украины

## Обусловленность горизонтальных нормальных напряжений контактным трением между слоями горных пород

*Показано, что механизм формирования сжимающих горизонтальных нормальных напряжений, включая аномальные, превышающие вертикальные, обусловлен контактным трением между слоями горных пород. Кроме аналитического определения этих напряжений, дано обоснование их механизма на основании векторного метода равновесия внешних и внутренних сил, действующих на треугольный элемент тела. Дано обобщение многочисленных данных измерений горизонтальных напряжений, проведенных исследователями в различных районах мира. Это подтверждает главную роль геомеханической природы возникновения горизонтальных напряжений в массивах горных пород. (Ил. 3. Библиогр.: 13 назв.)*

**Ключевые слова:** горизонтальные и вертикальные напряжения, горные породы, горное давление, сопротивление материала сдвигу, коэффициенты контактного и внутреннего трения.

*It is shown that the mechanism of horizontal compressive normal stresses, including abnormal, excess vertical, is caused by contact friction between the rock layers. Besides analytical determination of these stresses the substantiation of the mechanism is given on the basis of vector method of balance of internal and external forces affecting on the body triangular element. It is given a generalization of numerous horizontal stresses measurement data, conducted by researchers in different regions of the world. This confirms the main role of geomechanical nature genesis of the horizontal stresses in the rock mass.*

**Key words:** horizontal and vertical stresses, rocks, rock pressure, shear resistance of the material, the coefficients of the contact and internal friction.

### Постановка проблемы

После открытия в 60-х годах прошлого столетия аномальных горизонтальных напряжений, превышающих горное давление, названных тектоническими, в бывшем СССР и других странах активно проводились и проводятся измерения этих напряжений. Было выдвинуто много гипотез по этому явлению, что стало одной из важных проблем геодинамики горного дела и тектофизики. В статье [1] М. В. Курленя и Г. И. Кулаков отмечали, что «о механизме формирования повышенных тектонических напряжений в верхних горизонтах земной коры в геологической литературе высказан ряд гипотез, что подчеркивает неясность природы рассматриваемого феномена». Выявление механизма этих напряжений представляет собой крупную проблему геодинамики, горного дела тектофизики [2].

### Цель работы

Раскрыть механизм формирования горизонтальных напряжений в массивах горных пород.

### Анализ публикаций, посвященных тематике работы

Авторы [3] пытаются доказать, что аномальные горизонтальные напряжения обусловле-

ны разностью температур в приповерхностном слое земной коры континентов, при этом в верхних слоях значения  $\sigma_x/\sigma_y$  (где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – горизонтальные и вертикальные напряжения) достигают аномальных значений, а с увеличением глубины они уменьшаются. Согласно измерениям, проведенным многими исследователями, как раз наоборот, аномальность с увеличением глубины возрастает [4]. Укажем, что аномальные напряжения обнаружены и в сверхглубоких скважинах [5]. Кроме того, авторы используют известную формулу А. Н. Динника. Но применение этой формулы для массива вызывает большое сомнение, поскольку формула А. Н. Динника верна для тела, зажатого в обойме с абсолютно жесткими стенками, что не имеет места в массиве при равномерном его нагружении. Но из этих наших замечаний не вытекает, что не возникает климатических обусловленных горизонтальных напряжений, но роль их второстепенная.

Мы утверждаем, что главная роль в формировании упомянутых напряжений принадлежит геомеханическим процессам движения слоистоскладчатых структур горных пород. В рабо-

те [6], изложено геомеханическое обоснование формирования горизонтальных напряжений  $\sigma_x < \sigma_y$ ,  $\sigma_x = \sigma_y$ ,  $\sigma_x > \sigma_y$ , где  $\sigma_y = \gamma H$  - горное давление. Горизонтальные напряжения можно определить исходя из условия равновесия элемента тела под действием внешних нормальных и касательных сил:

$$\sigma_x = \frac{2(k + \mu\sigma_y)}{\cos \rho} \left( \sin \rho - \sqrt{1 - b^2} \right) + \sigma_y, \quad (1)$$

где  $k$  - сопротивление материала сдвигу;  $\mu$  и  $\rho = \arctg \mu$  - коэффициент и угол внутреннего трения;  $\sigma_y$  - вертикальное напряжение (горное давление);

$$b = f \sigma_y / (k + \mu\sigma_y), \quad (2)$$

где  $f$  - коэффициент внешнего (контактного) трения между слоями горных пород.

Из преобразования разности получены критерии превышения вертикальных напряжений над горизонтальными, гидростатического состояния и превышения горизонтальных напряжений над вертикальными:

$$b = \left| \frac{f\sigma_y}{k + \mu\sigma_y} \right| < \cos \rho; \quad b = \left| \frac{f\sigma_y}{k + \mu\sigma_y} \right| = \cos \rho;$$

$$b = \left| \frac{f\sigma_y}{k + \mu\sigma_y} \right| > \cos \rho.$$

Однако аналитический метод определения этих напряжений, основанный на проецировании на плоскость сечения элемента внешних сил, не обладает очевидностью формирования горизонтальных напряжений, особенно превышающих вертикальные. Для обеспечения равновесия элемента (треугольника) материала сразу предполагается наличие поперечных нормальных напряжений  $\sigma_x$ . Поэтому механизм этих напряжений раскрыт путем использования векторного метода равновесия внешних и внутренних сил. Но разработанный авторами векторный подход формирования сил привел к утверждению, что возможен при продольном сжатии случай возникновения растягивающих горизонтальных напряжений, но для такого утверждения недостаточно доказательств. Дальнейший анализ привел нас к отказу от принятого в статье принципа векторного анализа формирования горизонтальных напряжений.

Используем здесь известный в теории механизмов и машин метод определения равновесия сил, действующих на тело, перемещающееся на наклонной плоскости [7]. Главное условие этого метода заключается в равенстве нулю суммы векторов сил, действующих на тело. Воспользуемся этим принципом при решении задачи равновесия элемента материала. Напряжения, при-

ложенные к граням элемента (треугольника), представим через площади граней в виде соответствующих сил, а в качестве наклонной плоскости принимаем линию (плоскость) максимальных эффективных касательных напряжений по Кулону между треугольным элементом и отброшенной частью материала, а угол внутреннего трения  $\rho$  породы является углом трения между наклонной плоскостью и элементом материала.

В случае напряженного состояния так же, как и при рассмотрении равновесия тела на наклонной плоскости, движение элемента тела, например треугольного, будет осуществлено, когда внешние нагрузки на плоскости преодолеют силы торможения: силы трения на этой плоскости и сопротивление материала сдвигу  $k_n$  и нагрузки, приложенные на боковых гранях этого тела. Важно, чтобы сумма векторов была равна нулю.

Представим изложенный способ на двух примерах: в случае возникновения горизонтальных направлений сжимающих нормальных напряжений:  $0 < \sigma_x < \sigma_y$  и  $\sigma_x > \sigma_y$  при различном направлении контактных касательных напряжений. Сформулируем краевые условия деформирования слоя породы его сжатием при наличии обнажения. Для упрощения подхода принимаем нормальные сжимающие напряжения на границе равномерно распределенными. Краевые условия оказывают влияние на численные значения нормальных и касательных активных напряжений в каждой точке на контакте деформируемого материала и, вследствие этого, внутри материала. Представим, что наличие, направление и значение горизонтальных напряжений в поперечном направлении заранее неизвестно.

Для построения векторных диаграмм нужно рассчитать параметры нормальных и касательных напряжений, приложенных к граням треугольника, и углы наклона траектории максимальных эффективных касательных напряжений (ТМЭКН) при знании физико-механических показателей: сопротивления материала сдвигу, коэффициентов контактного и внутреннего трения. Методы расчета этих параметров в предельном состоянии материала изложены в статьях [8; 9]. Здесь воспользуемся результатами расчета. При направлении контактного трения между пластом и боковыми породами в сторону свободного пространства можно предполагать, что в пласте возникнут растягивающие горизонтальные напряжения. При расчете принимаем сопротивление материала сдвигу равным единице, угол внутреннего трения -  $40^\circ$ , коэффициент контактного трения -

0,25. Направим контактное трение в сторону свободного пространства (рис. 1а).

Расчетные значения  $\sigma_y = 4,64$ ,  $\sigma_x = 0,35$  и  $\alpha = 79^\circ$  относительно горизонтали. Изобразим треугольник  $abc$  (рис. 1а) с углом  $\alpha_1 = 79^\circ$  и гипотенузой  $ac$ , равной единице. На катете  $ab$  действует известное из расчета вертикальное нормальное напряжение  $\sigma_y$ , а на катете  $bc$  – неизвестное горизонтальное нормальное напряжение  $\sigma_x$  и известные, равные между собой по закону парности, касательные напряжения  $f_k \sigma_y$ . Выберем на поверхности ТМЭКН (гипотенузе  $ac$ ) любую точку (точка  $O$  на диаграмме рис. 1б). В точке  $O$  сумма всех сил равна нулю, так как треугольник  $abc$  находится в равновесии. Вертикальную силу  $\bar{N}_y$  представим как сумму сил от вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_y$ , умноженных на площадь  $ab$ , и от касательных напряжений  $f_k \sigma_y$ , умноженных на площадь  $bc$ . Горизонтальная сила  $\bar{N}_x$  определяется аналогично. Тогда  $N_y = \sigma_y \cos 79^\circ + f_k \sigma_y \sin 79^\circ = 2,02$  и  $N_x = f_k \sigma_y \cos 79^\circ = 0,22$ . Две внешние силы  $\bar{N}_y$  и  $\bar{N}_x$  образуют результирующий внешний вектор  $\bar{N}_a$  ( $OS$  на диаграмме).

Теперь предстоит определить результирующий вектор внутренних сил на ТМЭКН, сопротивляющихся внешнему воздействию. Для этого проведем через точку  $O$  (рис. 1б) линию  $mn$  параллельно ТМЭКН треугольника (рис. 1а), на которой действует вектор  $\mu \bar{\sigma}_\alpha$ . Параллельно ТМЭКН действует и вектор  $\bar{k}_n$  из точки  $K$ . Поскольку длина гипотенузы принята равной единице, эти векторы будут численно равны напряжениям. Теперь через точку  $O$  проведем линию

$mn$  перпендикулярно линии  $mt$ . Параллельно линии  $mn$  действует на диаграмме нормальное напряжение  $\sigma_n$ , образующее соответствующий вектор силы  $\bar{\sigma}_\alpha$ . Строим результирующий вектор сил на ТМЭКН. Сумма известных векторов сил, численно равных напряжениям  $\bar{k}_n$ ,  $\bar{\sigma}_\alpha$  и  $\mu \bar{\sigma}_\alpha$ , образует вектор  $\bar{R}$ . Для достижения равенства нулю суммы внутренних и внешних сил необходимо приращение внутренней силы  $\bar{N}_x$ , сжимающий материал на грани  $bc$  и имеющей вследствие этого положительный знак. Напряжения  $\sigma_x$  определяются путем деления величины силы  $\bar{N}_x$  на  $\sin \alpha_n$ . Это напряжение по численному значению и знаку совпадает с напряжением, полученным по формуле (1). Отметим, что сумма векторов от внутреннего трения образует вектор  $\bar{T}$ , расположенный под углом  $\rho$  относительно нормали к ТМЭКН согласно известному правилу механики движения тела на наклонной плоскости. Сумма векторов  $\bar{N}_a$ ,  $\bar{N}_x$  и  $\bar{R}$  равна нулю.

Аналогичным образом строятся диаграммы при направлении контактного трения между пластом и боковыми породами от обнажения в сторону массива и для гидростатического состояния при  $\sin \rho = \sqrt{1 - b^2}$  согласно формуле (1). В последнем случае доказывается равенство  $\sigma_x = \sigma_y$ . В обоих случаях горизонтальные напряжения являются сжимающими. При отсутствии контактного трения  $\sigma_x = 0$ .

Рассмотрим аномальный случай, когда  $\sigma_x > \sigma_y$  (рис. 2). Расчетные данные:  $k_n = 1,0$ ;  $\mu = 1,0$ ;  $f_k = 1,0$ ;  $\sigma_y = 61,7$ ;  $\sigma_x = 101,8$ ;  $\alpha_n = 121^\circ 40'$ . По расчетным данным строим суммарный вектор внеш-

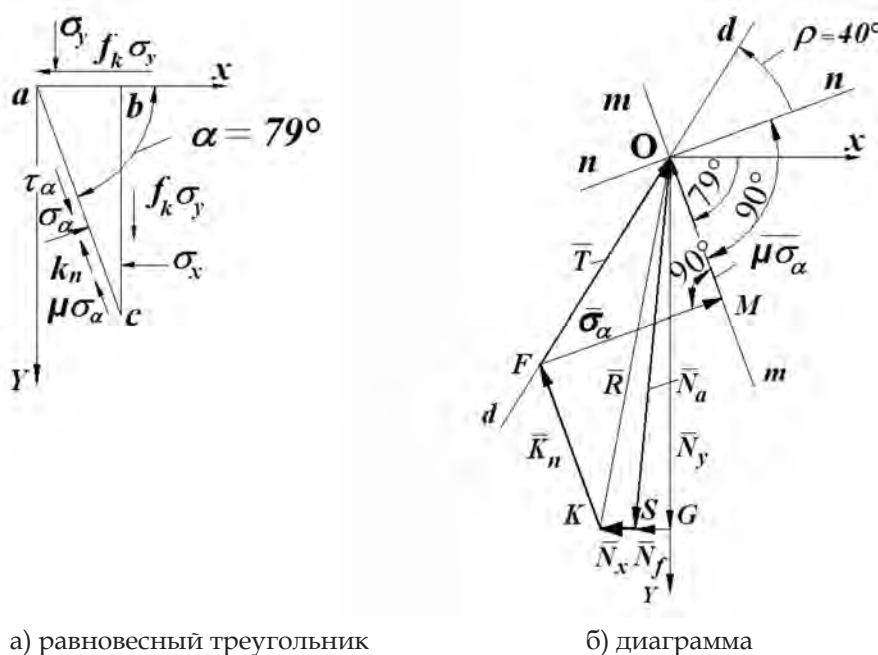


Рис. 1. Векторная диаграмма формирования горизонтальных сжимающих напряжений, меньших  $\sigma_y$ , при направлении контактных напряжений в сторону обнажения

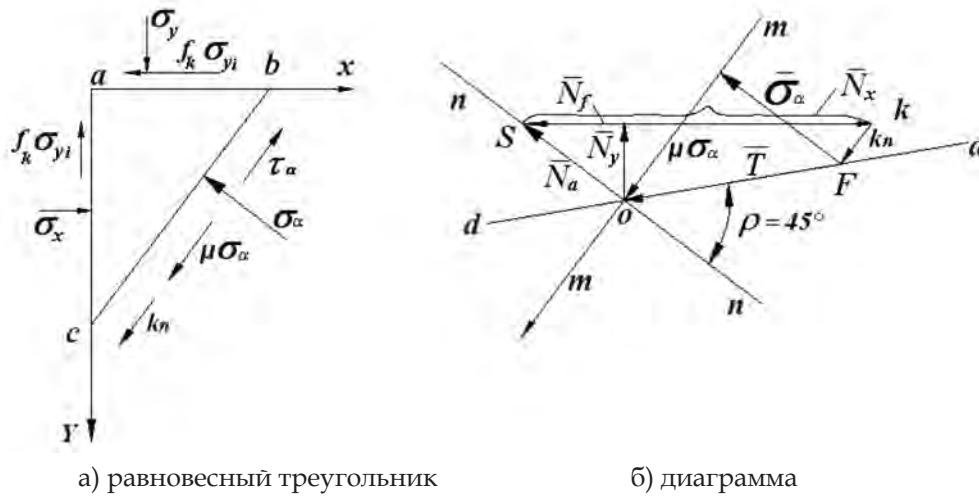


Рис. 2. Векторная диаграмма для определения горизонтальных нормальных напряжений, превышающих вертикальные

них сил  $\bar{N}_\alpha$ . Касательное напряжение  $k_n$  и составляющая от внутреннего трения Кулона  $\mu\sigma_\alpha$  направлены вниз (рис. 2).

Дадим описание диаграммы формирования аномальных горизонтальных нормальных сжимающих напряжений, превышающих вертикальные. Из расчета при условиях:  $k_n = 1,0$  МПа,  $\mu = 1,0$ ;  $f_k = 1,0$  получено, что угол  $a = 121^\circ 40'$ , напряжение  $\sigma_y = 61,7$  МПа. Строим равновесный треугольник при значении угла  $abc$ , равном  $58^\circ 20'$ . Значение гипотенузы  $bc$  принимаем равным единице. Тогда вертикальная сила равна  $\bar{N}_y = \sigma_y \cos 58^\circ 20' - f_k \sigma_y \sin 58^\circ 20' = -20,1$  МПа. Как видно, появилась сила, направленная вверх, т. е. на подъем элемента породы. Сила  $\bar{N}_f = f_k \cdot \sigma_y \cos 58^\circ 20' = 32,4$  МПа. Через точку  $O$  на гипотенузе  $bc$  на диаграмме проводим линию  $mm$ , параллельную  $bc$ , и проводим к ней перпендикулярную линию  $nn$ , относительно которой откладываем под углом  $\rho$  линию  $dd$  – линию трения. На ней проводим суммарный вектор  $\bar{T}$  от сложения векторов  $\bar{\sigma}_\alpha$  и  $\mu\bar{\sigma}_\alpha$ . Начальную точку  $F$  вектора  $\bar{T}$  соединяем с точкой  $K$  линией  $KF$ , параллельной гипотенузе и равной сопротивлению материала сдвигу  $k_n$ . Таким образом, мы можем сложить векторы  $\bar{N}_a$ ,  $\bar{N}_x$ ,  $k_n$  и  $\bar{T}$ , сумма которых равна нулю, что и требуется по условиям сложения сил равновесия тела на наклонной плоскости. Путем деления значения вектора  $N_x = 86,6$  МПа на  $\sin 58^\circ 20'$  получаем значение горизонтального напряжения 101,8 МПа, определяемое по формуле (1) и превышающее вертикальное напряжение  $\sigma_{y_i} = 61,7$  МПа. Примечательно, что за счет превышения горизонтальных напряжений над вертикальными меняют направления действия напряжения  $k_n$  и  $\mu\sigma_\alpha$ , и имеет место выпирание треугольника  $abc$  вверх, так как в этом направлении действует результирующий вектор вертикальных сил. Направива-

ется гипотеза о природе горообразования, потому что рассматриваемый элемент перемещается вверх вследствие действия результирующей нагрузки. Для уравнивания результирующего вектора внутренней нагрузки  $\bar{R}$ , кроме векторов  $k_n$ ,  $\mu\bar{\sigma}_\alpha$ ,  $\bar{\sigma}_\alpha$ , возникает необходимость приращения вектора  $\bar{N}_x$  вследствие действия контактных касательных напряжений. Из аналитического расчета вытекает, что горизонтальные напряжения формируются касательными напряжениями от контактного трения между слоями пород, т. е. от сопротивляемости сдвигу на контакте пласта с боковыми породами. Из рис. 3 можно убедиться, что отношение  $\sigma_x/\sigma_y$  может превысить десятикратное значение.

В некоторых работах, наряду с замерами горизонтальных напряжений, приводятся данные по типу пород между их слоями. Так, в [10] указывается, что в отдельных регионах Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов горизонтальные сжимающие напряжения составляют 80-90 % от вертикальных. Вмещающие по-

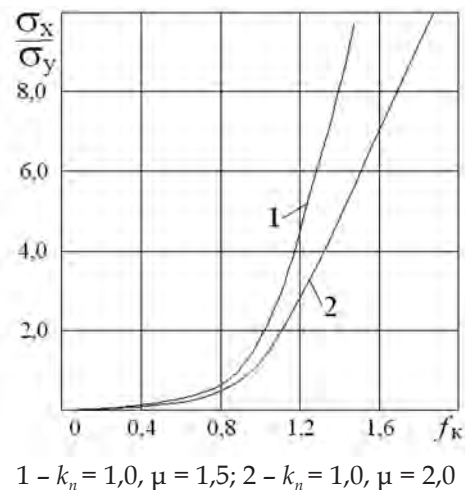


Рис. 3. Зависимости отношения  $\sigma_x/\sigma_y$  от коэффициента контактного трения

роды (кровля и почва) представлены преимущественно глинистыми и песчанистыми сланцами. «Контакты между слоями заполнены глинистым материалом, вследствие чего связь между отдельными слоями незначительна» [10]. Понятно, что в этих условиях горизонтальные нормальные напряжения не могут превышать вертикальные из-за малого значения сопротивления сдвигу на контакте слоев.

В районах повышенных горизонтальных напряжений Хибинского массива [11] и Горной Шории [12] свойства пород характеризуются высокой крепостью и сцеплением слоев, сцементированных мелкозернистыми материалами. В описании авторов нам не удалось обнаружить слабых глинисто-сланцевых отложений при наличии аномальных  $\sigma_x$ . Изложенное свидетельствует о том, что механизм формирования горизонтальных напряжений напрямую связан с прочностью контактных зон, с их сопротивлением сдвигу. Из предоставленных материалов расчета следует, что горизонтальные напряжения порождаются вертикальными вследствие возникновения от них касательных напряжений от контактного трения, в земной коре – гравитационными.

Это положение подтверждается по данным немецкой сверхглубокой скважины КТВ [5]. Для глубин 200–800 м в большинстве случаев установлен линейный закон изменения усредненных горизонтальных напряжений с ростом глубины» [4].

Начиная с глубины 600–800 м аномальность горизонтальных напряжений пород резко увеличивается. С глубины 750 м на ряде шахт Донбасса систематически стали происходить выбросы песчаников – горные удары [13], механизм которых обусловлен аномальностью горизонтальных напряжений. Здесь уместно заметить, что феномен перенапряжений толщи пород по горным ударам имеет место и в других районах и месторождениях бывшего СССР и стран мира [1].

### Выводы

1. Критерием значений горизонтальных напряжений является значение разности синуса угла внутреннего трения и выражения  $\sqrt{1-b^2}$  в формуле (1), которое преобразовывается в физические соотношения: при отношении контактных касательных напряжений к сопротивлению материала сдвигу, слагающемуся из сопротивления от сцепления и внутреннего трения, меньших косинуса угла внутреннего трения, возникают напряжения  $\sigma_x$ , меньшие напряжения  $\sigma_y$ , при равенстве – гидростатическое со-

стояние ( $\sigma_x = \sigma_y$ ), при больших – напряжения  $\sigma_x$  превышают гравитационное.

2. Не оспаривая определенное влияние на формирование горизонтальных сжимающих напряжений термомеханического градиента, мы утверждаем, что главную роль в этом процессе играет контактное трение между слоями горных пород при движении слоисто-складчатых структур горных массивов под действием горного давления, которое проявляется на поверхности в виде горообразования, в подземных условиях – в виде горных ударов.

### Библиографический список

1. Курленя М. В. Напряженное состояние породных массивов в верхних слоях земной коры / М. В. Курленя, Г. И. Кулаков // ФТПРПИ. – 1998. – № 3. – С. 3–9.
2. Ребецкий Ю. Л. Механизм генерации остаточных напряжений и больших горизонтальных сжимающих напряжений в земной коре внутриплитовых областей / Ю. Л. Ребецкий // Проблемы тектонофизики. – М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2008. – С. 431–466.
3. Сергин С. Я. Климатически обусловленные напряжения сжатия в приповерхностном слое земной коры континентов / С. Я. Сергин, С. В. Сергеев // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2014. – № 5. – С. 58–62.
4. Айтматов И. Т. Геомеханика рудных месторождений Средней Азии / И. Т. Айтматов. – Фрунзе: Илим, 1987. – 246 с.
5. Brudy, M. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength / M. Brudy, M. D. Zoback, K. Fuchs, F. Rummel and J. Baumgaertner // J. Geophys. Res. – 1997. – 102. – No. B8.
6. Васильев Л. М. Теоретическое обоснование формирования горизонтальных нормальных напряжений в массивах горных пород / Л. М. Васильев, Д. Л. Васильев // ФТПРПИ. – 2013. – № 2. – С. 81–90.
7. Кожевников С. Н. Теория механизмов и машин / С. Н. Кожевников. – М.: Машиностроение, 1973. – 591 с.
8. Васильев Л. М. Аналитический метод построения диаграмм «напряжение – деформация» образцов горных пород при их клиновой форме разрушения / Л. М. Васильев, Д. Л. Васильев // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 80–87.
9. Васильев Л. М. Аналитическое построение диаграмм «напряжение – деформация» образцов горных пород при их усечено-клиновой форме разрушения / Л. М. Васильев, Д. Л. Васильев, О. А. Усов // Металлургическая и горно-

рудная промышленность. – 2013. – № 6. – С. 81–84.

10. Галушко П. Я. Результаты исследования напряжений в массивах горных пород Львовско-Вольнского и Донецкого угольных бассейнов / П. Я. Галушко // Напряженное состояние земной коры. – М.: Наука, 1973.

11. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах / под ред. акад. М. В. Курлени. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1996. – Ч. 1. – 162 с.

12. Шаманская А. Т. Соотношение тектонических элементов с полями современных напряжений в Горной Шории / А. Т. Шаманская, П. В. Егоров // Напряженное состояние земной коры. – М.: Наука, 1973.

13. Волошин Н. Е. Основы тектонофизической теории выбросов твердых ископаемых и пород в шахтах / Н. Е. Волошин. – Донецк: СПД Дмитренко, 2007. – 65 с.

Поступила 15.02.2016



УДК 622.7.09.543.52

Наука

А. Н. Гриценко

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

### Обоснование геометрических параметров зондового устройства для оценки качества руд путем каротажа взрывных скважин

*Информацию о содержании Fe в горном массиве можно получить при каротаже буровзрывных скважин на основе гамма-гамма метода. В ходе экспериментальных исследований было установлено влияние изменения зазора при различном взаимном расположении источника и приемника гамма-излучения. Обоснованы параметры зондового устройства, обеспечивающие минимальную погрешность определения содержания Fe. (Ил. 9. Библиогр.: 4 назв.)*

**Ключевые слова:** зондовое устройство, качество руд, каротаж взрывных скважин.

*Information on the content of Fe in a massif can be obtained during electric coring of mining holes on the base of gamma-gamma method. On the basis of pilot studies, influences of change of a gap at various relative positioning of a source and receiver of gamma radiation were established. The parameters of the probe device providing the minimum error of determination of content of Fe are proved.*

**Key words:** detection mechanism, ore grade, electric coring of mining holes.

#### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Для управления технологическими процессами, направленными на повышение качества концентрата, снижение потерь железных руд необходима оперативная и достоверная информация о содержании железа общего в гематитовой руде. Данные необходимы как в естественном ее залегании, так и при переработке. Контроль осуществляется ручным отбором проб с последующим химическим анализом, что является ресурсозатратным и неоперативным способом.

Информацию о содержании Fe в горном массиве можно получить при каротаже буровзрыв-

ных скважин на основе *гамма-гамма метода*, основанного на зависимости интенсивности  $N$  гамма-излучения, отраженного от исследуемой железной руды при ее облучении – от содержания в ней Fe:  $N = f(Fe)$ . При этом чем больше содержание Fe как элемента с наибольшим атомным номером в исследуемой руде, тем больше поглощение и, соответственно, меньше интенсивность отраженного гамма-излучения.

При использовании гамма-гамма метода существует ряд факторов, снижающих точность измерений. Согласно данным **анализа публикаций** [1; 2], а также проведенным нами экспериментам, одним из основных факторов, снижающих точность измерений, являются колеба-