

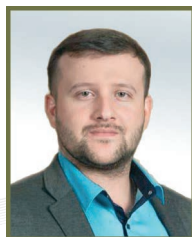
I. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ГЕОМЕХАНИКА

I. INDUSTRIAL SAFETY AND GEOMECHANICS



В.В. Иванов // V.V. Ivanov

д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник АО «НЦ ВостНИИ», Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3
doctor of technical sciences, professor, leading scientific researcher of AO "ScC VostNII", Russia, 650002, Kemerovo, Institutskaia St., 3



В.В. Семенов // V.V. Sementsov

канд. техн. наук, заведующий лабораторией горной геомеханики АО «НЦ ВостНИИ», Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3
candidate of technical sciences, mining geomechanics laboratory head of AO "ScC VostNII", Russia, 650002, Kemerovo, Institutskaia St., 3



В.С. Зыков // V.S. Zykov

д-р техн. наук, профессор, зам. генерального директора по научной работе АО «НЦ ВостНИИ»; Russia, 650002, Kemerovo, Institutskaia St., 3
doctor of technical sciences, deputy general director for scientific work, AO "ScC VostNII" Russia, 650002, Kemerovo, Institutskaia St., 3



П.В. Потапов // P.V. Potapov

канд. техн. наук, зав. лабораторией борьбы с газодинамическими проявлениями АО «НЦ ВостНИИ» Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3
candidate of technical sciences, gas-dynamic phenomena suppression laboratory head, AO "ScC VostNII" Russia, 650002, Kemerovo, Institutskaia St., 3



К.Х. Ли // K.Kh.Li

научный сотрудник лаборатории борьбы с газодинамическими проявлениями АО «НЦ ВостНИИ», Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3
scientific researcher of gas-dynamic manifestation suppression laboratory, AO "ScCVostNII", Russia, 650002, Kemerovo, Institutskaia St., 3

УДК 622.273.18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВБЛИЗИ РАЗЛОМОВ И НАРУШЕНИЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЯ АНДЕРСОНА

ADDITIONAL TECTONIC HORIZONTAL STRESSES IDENTIFICATION NEAR EARTH'S CRUST FRACTURES AND DISRUPTIONS BASED ON ANDERSON'S FRACTURE FORMATION THEORY

Приводятся результаты расчета углов падения тектонических нарушений и разломов в земной коре, а также дополнительных горизонтальных тектонических напряжений, необходимых для образования нарушений и разломов. Показано, что как углы падения нарушений и разломов типа надвига и сброса, так и дополнительная горизонтальная компонента тензора напряжений зависят существенным образом от коэффициента трения на берегах разлома. Полученные результаты могут быть использованы для оценки тектонических напряжений вблизи нарушений при отработке рудных залежей России и пород рудника «Интернациональный» АК АЛРОССА.

The calculation results of crust tectonic disruptions and fractures inclination angles, as well as additional horizontal tectonic stresses necessary for disruptions and fractures formation are given. It is shown that both the inclination angles of disruptions and fractures such as thrusts and faults, as well as the additional horizontal component of the stress tensor, depend significantly on the friction coefficient at the fracture banks. The obtained results can be used to estimate tectonic stresses in the vicinity of the disruptions when mining Russia's ore deposits and rocks of AK ALROSSA "Internatsionalny" ore mine.

Ключевые слова: ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, УГОЛ ПАДЕНИЯ, РАЗЛОМ, ТЕКТОНИЧЕСКОЕ НАРУШЕНИЕ, ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ КОМПОНЕНТА, НАДВИГ, СБРОС

Key words: TECTONIC STRESSES, INCLINATION ANGLE, FRACTURE, TECTONIC DISRUPTION, ADDITIONAL HORIZONTAL COMPONENT, THRUST, FAULT.

При разработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах возникает необходимость прогноза величины дополнительной компоненты горизонтальных тектонических напряжений, т.к. это может приводить к горным ударам, динамическим формам проявления горного давления и газодинамическим явлениям комбинированного типа (как это происходит, например, на Таштагольском железорудном месторождении и руднике «Интернациональный» АК АЛРОССА).

Будем считать, что горизонтальные и вертикальные напряжения являются главными напряжениями в массиве горных пород (рис.1).

Обозначим через β угол падения разлома. Тогда компоненты тензора напряжений запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -\rho gH + \Delta\sigma_{xx}, \\ \sigma_{yy} &= -\rho gH, \\ \sigma_{zz} &= -\rho gH + \nu\Delta\sigma_{xx}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta\sigma_{xx}$ – дополнительная компонента горизонтальных тектонических напряжений, отрицательная для надвига и положительная для сброса; H – глубина от поверхности земли. Здесь и далее мы будем считать отрицательными сжимающие напряжения, положительными – растягивающие. Последняя компонента формул

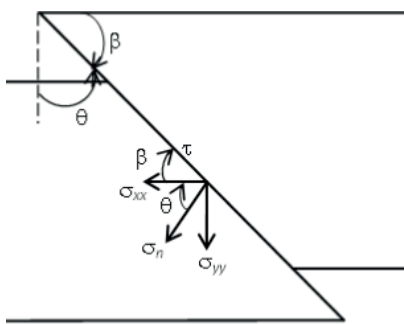


Рисунок 1 – Главные, нормальное и касательное, напряжения на разломе со смещением по падению
Figure 1 - Main, normal and tangential stresses at the fracture with a dip shift

(1) получается из условия, что дополнительная тектоническая компонента деформации $\Delta\epsilon_{zz} = 0$.

Направим по осям x, y единичные орты \vec{e}_1, \vec{e}_2 , а по направлению касательного и нормального напряжений (τ, n) орты \vec{e}'_1, \vec{e}'_2 (рис. 1).

Тогда вектор механического напряжения на плоскости разлома через его проекции на эти оси можно записать:

$$\vec{\sigma} = \sigma_i \vec{e}_i = \sigma'_j \vec{e}'_j \quad (2)$$

Чтобы получить касательное и нормальное напряжения на разломе нужно умножить скалярно последнее выражение сначала на \vec{e}'_1 а затем на \vec{e}'_2 . В результате мы получим:

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma_i \vec{e}_i \vec{e}'_1 = \sigma_i \alpha_{i1} = \sigma_{ij} n_j \alpha_{i1} = \sigma_{11} n_1 \alpha_{11} + \sigma_{22} n_2 \alpha_{21} = \\ &= \sigma_{11} \sin 2\beta / 2 - \sigma_{22} \sin 2\beta / 2 = \Delta\sigma_{xx} \sin 2\beta / 2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha_{ij} = \vec{e}_i \vec{e}'_j, n_1 = \sin \beta, n_2 = \cos \beta$ обозначено компоненты единичного вектора нормали в проекции на оси исходной системы координат.

Из рисунка 1 легко получить, что $\alpha_{12} = \sin \beta, \alpha_{22} = \cos \beta$. В формуле (3) мы учли, что главные оси 1 и 2 совпадают с осями x и y , компоненты напряжения связаны на любой площадке с нормалью n с компонентами тензора напряжений следующим выражением: $\sigma_i = \sigma_{ij} n_j$ где по повторяющемуся индексу j ведется суммирование по правилу Эйнштейна. Кроме того, мы учли выражения (1) для компонент главных напряжений. Аналогично для нормального напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_i \vec{e}_i \vec{e}'_2 = \sigma_i \alpha_{i2} = \sigma_{ij} n_j \alpha_{i2} = \sigma_{11} n_1 \alpha_{12} + \sigma_{22} n_2 \alpha_{22} = \\ &= \sigma_{xx} \sin^2 \beta + \sigma_{yy} \cos^2 \beta = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) / 2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{xx}) \cos 2\beta / 2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha_{12} = \sin \beta, \alpha_{22} = \cos \beta$ (см. рис. 1).

Связь между касательным и нормальным напряжениями на поверхности (при образовании разлома) выражается формулой Амонтона – Кулона

$$\tau = f_s \sigma_n, \quad (5)$$

где f_s – коэффициент сухого трения на берегах разлома.

Подставляя формулы (3) и (4) в формулу (5) и выражая из полученной формулы модуль

тектонической компоненты тензора напряжений, получаем:

$$|\Delta\sigma_{xx}| = \mp 2f_s \rho g H / [\sin 2\beta \pm f_s (\cos 2\beta - 1)], \quad (6)$$

где верхний знак соответствует надвигу, а нижний – сбросу.

Основная идея теории Андерсона состоит в том, что разломы образуются под такими углами падения, при которых модуль горизонтальной тектонической компоненты тензора напряжений достигает своего минимального значения. Очевидно, этого можно достичь, считая, что знаменатель выражения (6) минимален. Беря производную от знаменателя по углу падения и приравнявая полученное выражение к нулю, получим:

$$\cos 2\beta \mp f_s \sin 2\beta = 0. \quad (7)$$

Отсюда получаются два решения в соответствии со знаками в уравнении (7)

$$\begin{aligned} \beta &= \arctg(f_s^{-1}) / 2, \\ \beta &= -\arctg(f_s^{-1}) / 2 + \pi / 2. \end{aligned} \quad (8)$$

Верхняя формула в выражении (8) соответствует углу падения надвига, нижняя – углу падения сброса.

На рис. 2 приведена зависимость углов падения надвига и сброса от коэффициента трения на берегах разлома. Для реально наблюдаемых углов падения коэффициент трения должен быть выбран порядка 0.36 [1]. В этом случае угол падения надвига равен 35,1°, а угол падения сброса соответственно 54,9° (см. рис. 2).

Для того чтобы получить оценку тектонических напряжений, нужно подставить решение (8) в формулу (6) и учесть знак

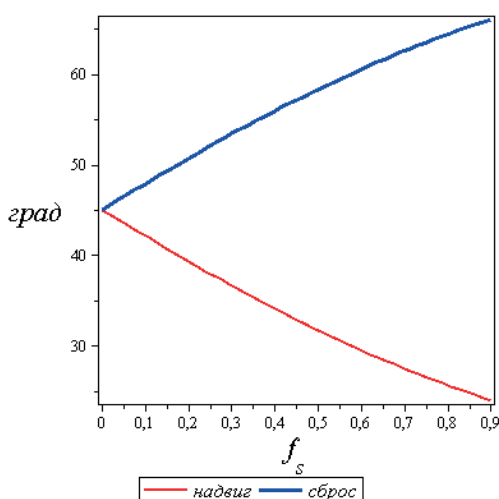


Рисунок 2 – Зависимость углов падения надвига и сброса от коэффициента трения на берегах разлома

Figure 2 - Inclination angles of thrust and fault dependence on the friction coefficient at the fracture banks

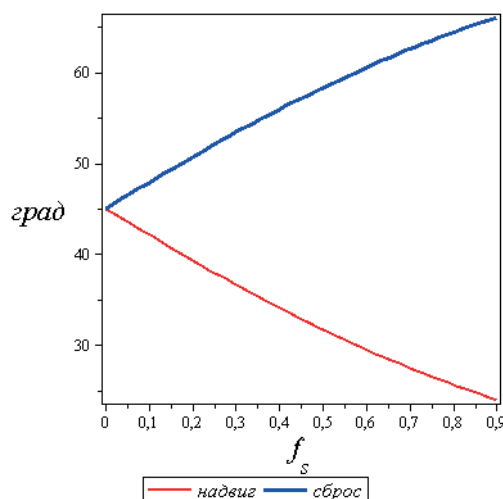


Рисунок 3 – Зависимость дополнительной горизонтальной тектонической составляющей напряжений для надвига и сброса от коэффициента трения на берегах разлома

Figure 3 - Additional horizontal tectonic and fault stresses component dependence on the friction coefficient at the fracture banks

дополнительной тектонической горизонтальной составляющей напряжений для надвига и сброса, в результате мы получим:

$$\Delta\sigma_{xx} = \mp f_s (-\rho g H) / [\pm f_s - \text{sqrt}(1 + f_s^2)], \quad (9)$$

где верхний знак соответствует надвигу, а нижний – сбросу.

На рис. 3 приведена зависимость горизонтальной дополнительной компоненты тектонических напряжений от коэффициента трения на берегах разлома. Как известно [1], для реальных значений углов падения надвигов и сбросов коэффициент трения на берегах разлома равен примерно 0,36, поэтому, пользуясь полученной зависимостью (9), можно оценить дополнительную компоненту тензора напряжений для надвига и сброса на глубине 1200 м от поверхности земли следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{xx} &= -29.4 \text{ МПа}, \\ \Delta\sigma_{xx} &= 14.9 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (10)$$

По формулам (1) можно оценить полные главные компоненты тензора напряжений, из которых нас будет интересовать лишь горизонтальная компонента:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -59.5 \text{ МПа} - \text{надвиг}, \\ \sigma_{xx} &= -14.5 \text{ МПа} - \text{сброс}. \end{aligned} \quad (11)$$

Как видно из полученных результатов, наибольшее значение тектонические напряжения достигают вблизи нарушения (разлома) типа надвига, причем эти напряжения

сжимающие. Именно в условиях сжимающих напряжений и рождаются надвиги, поэтому они наиболее распространены на горнодобывающих предприятиях. По порядку величина сжимающих

напряжений при образовании надвига в нашем случае сравнима с напряжениями, снимаемыми при крупных землетрясениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.В. Механика блочных структур. Электронное учебное пособие. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2015. 107 с.

REFERENCES

1. Ivanov, V.V. (2015). Mekhanika blochnykh struktur [Mechanics of block structures]. Kemerovo: KuzGTU [in Russian].



ДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ (ДЛЯ ВСЕХ ВИДОВ ПЫЛИ)

Уникальные запатентованные разработки
ООО «Горный-ЦОТ»



- Датчик **ИЗСТ-01** для контроля рабочей зоны
- Датчик **ИЗСТ-mini** для контроля СЗЗ, городов и объектов с низкой запыленностью (2,5PM, 10PM)
- Система контроля пылеотложения, запыленности и дисперсного состава **СКИП** с использованием элементов нейросети
- Переносной прибор контроля запыленности **ПКА-01**

Применяются на всех угольных предприятиях Кузбасса, РФ и зарубежом