

УДК 622.831.332

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2016

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВОГНУТО-ПЛОСКОЙ ФОРМЫ ЗАБОЯ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВНЕЗАПНЫМИ ОТЖИМАМИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ ПОРОД

С.С. Андрейко

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

GEOMECHANICAL JUSTIFICATION OF THE APPLICATION OF CONCAVE-FLAT SHAPE OF MINE EXCAVATION STOPE FACE TO CONTROL SUDDEN ROCK SPELLING

S.S. Andreiko

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaia st., Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 23.11.2015. Принята / Accepted: 20.02.2016. Опубликовано / Published: 30.03.2016

Ключевые слова:

газодинамические явления, горная выработка, проходческо-очистной комбайн, внезапный отжим, форма забоя, метод граничных элементов, запрельное состояние, критерий Кулона, газосолевой поток, щит ограждения.

Газодинамические явления в виде внезапных отжимов призабойной части пород происходят при ведении подготовительных и очистных горных работ в условиях Верхнекамского и Старобинского месторождений калийных солей. Внезапные отжимы призабойной части пород происходят из груди забоя интенсивностью не более единиц тонн, но совершаемая ими работа угрожает жизни шахтеров и вызывает разрушение отдельных конструктивных элементов дорогостоящих проходческо-очистных комбайнов. В настоящее время оборудование проходческо-очистных комбайнов щитами ограждения не дает эффекта защиты персонала от поражающих факторов газодинамических явлений данного вида.

В работе приводятся результаты геомеханического обоснования применения вогнуто-плоской формы забоя горной выработки для управления внезапными отжимами призабойной части пород при проходке подготовительных и очистных горных выработок. Пространственное моделирование напряженно-деформированного состояния соляного породного массива в окрестности забоя горной выработки проводилось на основе метода граничных элементов в линейно-упругой постановке. Для решения задачи о напряженно-деформированном состоянии кусочно-однородной упругой среды непрямым методом граничных элементов применялась итерационная схема для граничных и двойных (контактных) элементов на основе метода Зейделя с использованием кусочно-линейной аппроксимации на треугольных элементах. При использовании геомеханической модели линейно деформируемого массива применялся метод суперпозиции решений. При этом расчетная схема расчленяется на две части: расчетная схема для нетронутого породного массива, нагруженного объемными силами горного давления, и расчетная схема для невесомого породного массива с горной выработкой, контур которой нагружен объемными силами горного давления, действующими в нетронутом массиве и направленными в сторону выработки. При анализе запрельного состояния горных пород в окрестности забоя использовался комплексный критерий Кулона. Геомеханическая оценка проводилась для двух форм забоя – плоской и вогнуто-плоской. Установлено, что вогнуто-плоская форма забоя по сравнению с плоской обеспечивает более устойчивое состояние соляного породного массива впереди забоя за счет существенного снижения уровня действующих в массиве напряжений и деформаций.

Key words:

gas dynamics phenomena, mine excavation, excavation and load-haul machinery, sudden spelling, stope face shape, boundary element method, out-of-limit state, Coulomb criteria, gas-salt flow, fence shield.

In the conditions of Verkhnekamsk and Starobinsk potash deposits the phenomena of gas dynamics that represent sudden stope face rock spelling occur during primary and cleaning mining operations. Sudden spelling of stope face rocks starts from the flat face with rate of less than several tones. Nevertheless, its action threatens miners' lives and leads to destruction of particular construction elements of valuable excavation and load-haul machinery. At the moment equipping of excavation and load-haul machinery by fence shields cannot protect staff from damaging factors of gas phenomena this kind.

The paper shows results of geomechanical justification of application of concave-flat shape of mine stope face for control of sudden face rock spelling during excavation of primary and cleaning shafts. Space modeling of strain-stress state of salt deposits near the stope face of mine excavation was performed on boundary elements method in linear-elastic mode. To solve the problem of strain-stress state of piecewise-homogenous elastic medium by indirect method of boundary elements iteration scheme for border and dual elements was used based on Seidel method. Method included piecewise-linear approximation on triangle elements. During the operating of geomechanical model of linear-deformation medium solution superposition method was used. Wherein, calculation scheme consist of two parts: calculation scheme of virgin rock medium that is loaded by volumetric forces of overburden pressure and calculation scheme for weightless medium with mining with contour that is loaded by volumetric forces of overburden pressure that occur in virgin rock medium and directed towards mining. During the analysis of out-of-limit state of rocks near the stope face integrated criteria of Coulomb was used. Geomechanical evaluation was done for two shapes of faces: concave-flat and flat. It was determined that concave-flat shape of face in comparison with flat one has more stable state of salt rock medium ahead of stope face due to significant decrease of level of stress and deformation massif.

Андрейко Сергей Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией геотехнологических процессов и рудничной газодинамики (тел.: +007 (342) 216 58 42, e-mail: ssa@mi-perm.ru).

Sergei S. Andreiko (Author ID in Scopus: 6506180352) – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics (tel.: +007 (342) 216 58 42, e-mail: ssa@mi-perm.ru).

Введение

Газодинамические явления в виде отжимов призабойной части пород, сопровождающихся газовыделением, происходят при проходке подготовительных горных выработок и очистных камер в условиях Верхнекамского и Старобинского месторождений калийных солей [1–3]. Так, например, в условиях Старобинского месторождения общее количество отжимов призабойной части пород составляет 36 % от общего количества газодинамических явлений, имевших место на месторождении. Интенсивность отжимов призабойной части пород, которые происходят, как правило, из груди забоя, обычно не превышает единиц тонн, но совершаемая ими работа угрожает жизни шахтеров и вызывает разрушение отдельных конструктивных элементов дорогостоящих проходческих комбайнов. При проходке подготовительных выработок неоднократно имели место случаи отжимов призабойной части пород, когда порода разрушалась до мелких фракций и выносилась с большой скоростью в призабойное пространство, травмируя при этом шахтеров. Кроме этого, при отжимах призабойной части пород были случаи отброса проходческого комбайна весом примерно 60,0 т от забоя на 1,5–2,0 м и травмирования при этом шахтеров.

В настоящее время основным мероприятием по защите от поражающих факторов отжимов призабойной части пород является оборудование проходческих комбайнов щитами ограждения, которые должны выполнять функцию защиты шахтеров от травмирования мелкими породными фракциями газосолевого потока [4]. Однако практика ведения горных работ на сильвинитовых пластах свидетельствует о недостаточной эффективности применения ограждающих щитов. В отдельных случаях щиты ограждения при отжимах призабойной части пород разрушались на отдельные элементы, выносились газосолевым потоком в призабойное пространство выработки, т.е. не всегда выполняли функцию защиты персонала от разлета мелких фракций породы.

Исследования показали целесообразность осуществления конструктивного изменения рабочих органов проходческих комбайнов, применяемых при ведении горных работ на сильвинитовых пластах. Так, д-ром техн. наук, проф. О.В. Ковалевым предлагалось оборудовать исполнительные органы комбайнов опережающими забурниками длиной до 0,5 м [5]. Однако это предложение не получило практической реализации в конструкции исполнительных органов проходческих комбайнов.

Исследования механизма инициирования газодинамических явлений в подготовительных забоях, проходимых по угольным пластам и песчанникам, показали, что управлять газодинамическими процессами можно путем создания рациональной формы забоя [6–8]. Механизм разрушения породного массива вокруг горных выработок, протекающего как в статической, так и в динамической форме, обусловлен неравнокомпонентным сжатием горных пород, а точнее, их неравномерной разгрузкой от исходного напряженного состояния до состояния, возникшего в результате проведения выработки. При этом одна компонента напряжений – радиальная, действующая ортогонально свободной поверхности выработки, снижается довольно быстро, а две другие – тангенциальные, параллельные поверхности, не только не снижаются, но и даже увеличиваются [8, с. 55–61]. Следствием сказанного является, в частности, возникновение высоких касательных напряжений, формирующих разрушение в виде сдвига, а также появление деформаций растяжения, вызывающих разрушение в виде отрыва. При этом форма породного обнажения (форма контура выработки, в том числе и ее забоя) оказывает определяющее влияние на компоненты напряженного состояния и, как следствие, на формирование зоны разрушения вокруг обнажения. Поэтому для оценки возможности управления внезапными отжимами в забое подготовительной выработки путем создания его рациональной формы проводился пространственный (трехмерный) геомеханический анализ напряженно-деформированного состояния соляного породного массива.

Расчет напряженно-деформированного состояния соляного породного массива в забое горной выработки

Пространственное моделирование напряженно-деформированного состояния соляного породного массива в окрестности забоя проводилось на основе метода граничных элементов (МГЭ) в линейно-упругой постановке, который позволяет снизить размерность решаемой задачи на единицу и требует минимальных затрат времени на задание геометрии и граничных условий [9]. Для решения задачи о напряженно-деформированном состоянии кусочно-однородной упругой среды непрямым методом граничных элементов разработана итерационная схема для граничных и двойных (контактных) элементов на основе метода Зейделя с использованием кусочно-линейной аппроксимации на треугольных элементах [10–17].

При использовании геомеханической модели линейно деформируемого массива применялся метод суперпозиции решений. При этом расчетная схема расчленяется на две части: расчетная схема для нетронутого породного массива, нагруженного объемными силами горного давления, и расчетная схема для невесомого породного массива с горной выработкой, контур которой нагружен объемными силами горного давления, действующими в нетронутом массиве и направленными в сторону выработки.

Метод суперпозиции позволяет достаточно эффективно решать поставленную задачу методом граничных элементов, поскольку фиктивные нагрузки определяются лишь на контуре выработки и на контактах слоев. Тогда методом граничных элементов находится дополнительное напряженно-деформированное состояние, которое формируется в результате производства горных работ, а искомые полные напряжения определяются суперпозицией напряженного состояния нетронутого массива и найденных дополнительных напряжений.

Программа для расчета реализована в среде программирования Delphi 7 и включает следующие модули: автоматическую триангуляцию границы, рассчитываемой области; построение мат-

риц влияния граничных элементов; модуль, реализующий итерационную схему для определения фиктивных нагрузок на граничных элементах и модуль вывода компонент тензора напряжений и деформаций, вектора перемещений, главных напряжений и других характеристик напряженно-деформированного состояния в заданную сетку, покрывающую анализируемую область горного массива.

Метод граничных элементов позволяет искать решение задачи об определении напряженно-деформированного состояния в бесконечном упругом пространстве. Тогда модель неоднородного соляного породного массива в условиях проходки подготовительной выработки в пределах калийного пласта построится следующим образом. Упругие константы бесконечной упругой среды принимаются как средневзвешенные по мощностям составляющих массив пород и равны соответственно $E = 6,48$ ГПа и $\nu = 0,3$ для модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Анализ упругих характеристик соляных пород калийного пласта и вмещающих его соляных и глинисто-мергелистых пород позволяет выделить из горного массива в окрестности подготовительной выработки в условиях Старобинского месторождения следующие области неоднородности, по мощности каждой из которых наблюдается незначительный разброс упругих свойств (не более 20 %): 11-я соляная пачка ($E = 8,52$ ГПа, $\nu = 0,3$) мощностью 30 м; 12-я пачка (12-й глинисто-мергелистый горизонт, $E = 2,82$ ГПа, $\nu = 0,4$) мощностью 24 м; слой подстилающей каменной соли и нижняя промышленная сильвинитовая пачка ($E = 8,52$ ГПа, $\nu = 0,3$) мощностью 13 м; глинисто-карналлитовая пачка ($E = 5,64$ ГПа, $\nu = 0,4$) мощностью 3 м; верхняя забалансовая сильвинитовая пачка и слой покровной каменной соли ($E = 8,52$ ГПа, $\nu = 0,3$) мощностью 18 м.

Области неоднородностей в расчетной схеме должны иметь ограниченные размеры, так как согласно МГЭ площадь поверхности тела должна быть конечной. Эти области моделируются прямоугольными параллелепипедами с высотой, соответствующей мощностям пачек, а горизонтальные размеры выбираются исходя из соображения, что дальнейшее их увеличение не влияет на гео-

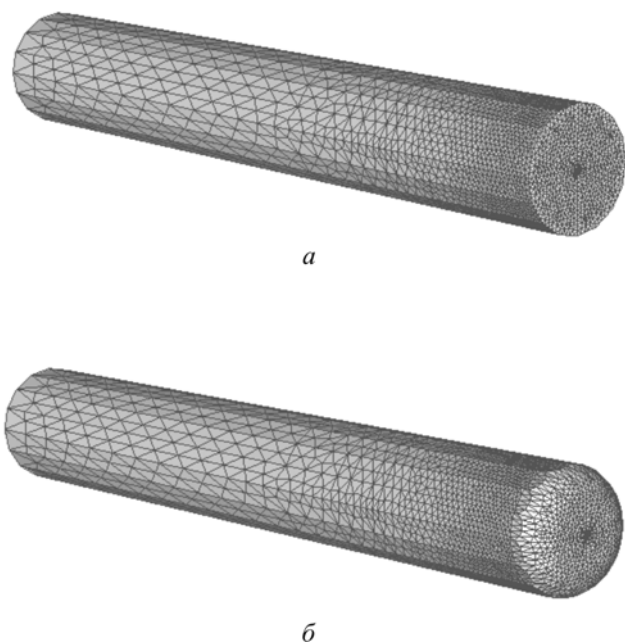


Рис. 1. Геометрия выработок с плоской (а) и вогнуто-плоской (б) формами забоя

механическое состояние пород анализируемой области массива.

Глубина ведения горных работ на третьем калийном пласте – 700 м. Средний удельный вес пород – $2 \cdot 10^4$ Н/м³. Коэффициент бокового распора рассчитывался по Диннику и был равен 0,42. При анализе запредельного состояния горных пород в окрестности забоя использовался комплексный критерий Кулона:

$$\tau > c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\varphi),$$

$$\sigma_1 > \sigma_p,$$

где τ и σ_n – касательное и нормальное напряжения на площадке разрушения; c – коэффициент сцепления (9 МПа); φ – угол внутреннего трения (30°); σ_1 – наибольшее главное напряжение; σ_p – предел прочности на одноосное растяжение (2 МПа).

Для приведенных значений коэффициента сцепления и угла внутреннего трения предел прочности на одноосное сжатие составит около 30 МПа.

Анализ напряженно-деформированного состояния пород в окрестности забоя проводился для выработок круглой формы поперечного сечения диаметром 3 м и длиной 20 м. Геомеханическая оценка проводилась для двух форм забоя – плоской и вогнуто-плоской с радиусом

сопряжения образующей цилиндра выработки с плоскостью забоя, равным 0,7 м, при этом диаметр плоской части забоя составляет 1,6 м (рис. 1). Сетка граничных треугольных элементов сгущалась в окрестности забоя с характерным размером элементов 0,1 м.

Моделирование напряженно-деформированного состояния в окрестности забоя плоской и вогнуто-плоской формы

Анализ напряженно-деформированного состояния массива в окрестности забоя показывает, что для обоих типов формы имеет место концентрация вертикальных напряжений в верхней и нижней части забоя (рис. 2). Основное различие в распределении вертикальных напряжений для различных форм забоя заключается в том, что для плоского забоя область концентрации напряжений формируется впереди забоя, а для вогнуто-плоского – позади груди забоя, над и под сопряжением выработки с плоской частью забоя.

Анализ деформированного состояния показывает, что в результате проведения выработки впереди забоя реализуются растягивающие горизонтальные деформации, направленные перпендикулярно забою и способствующие прорастанию трещин, параллельных обнажению (рис. 3). При этом если из некоторой точки забоя провести луч в направлении движения забоя, то растягивающие деформации достигают максимума на некотором расстоянии от забоя. Это расстояние максимально на оси выработки и составляет для обеих форм забоя 0,5 м. Таким образом, поверхность, на которой реализуются максимальные растягивающие деформации, принимает форму линзы, примыкающей к забою. Однако для плоского забоя линза охватывает весь забой, а для вогнутого – только его грудь. Также следует отметить, что вогнутая форма забоя по сравнению с плоской снижает растягивающие деформации на оси выработки на 10–12 %, а по периметру забоя на величину до 30–35 %.

Геомеханическое состояние горного массива в окрестности забоя характеризуется тем, что порода

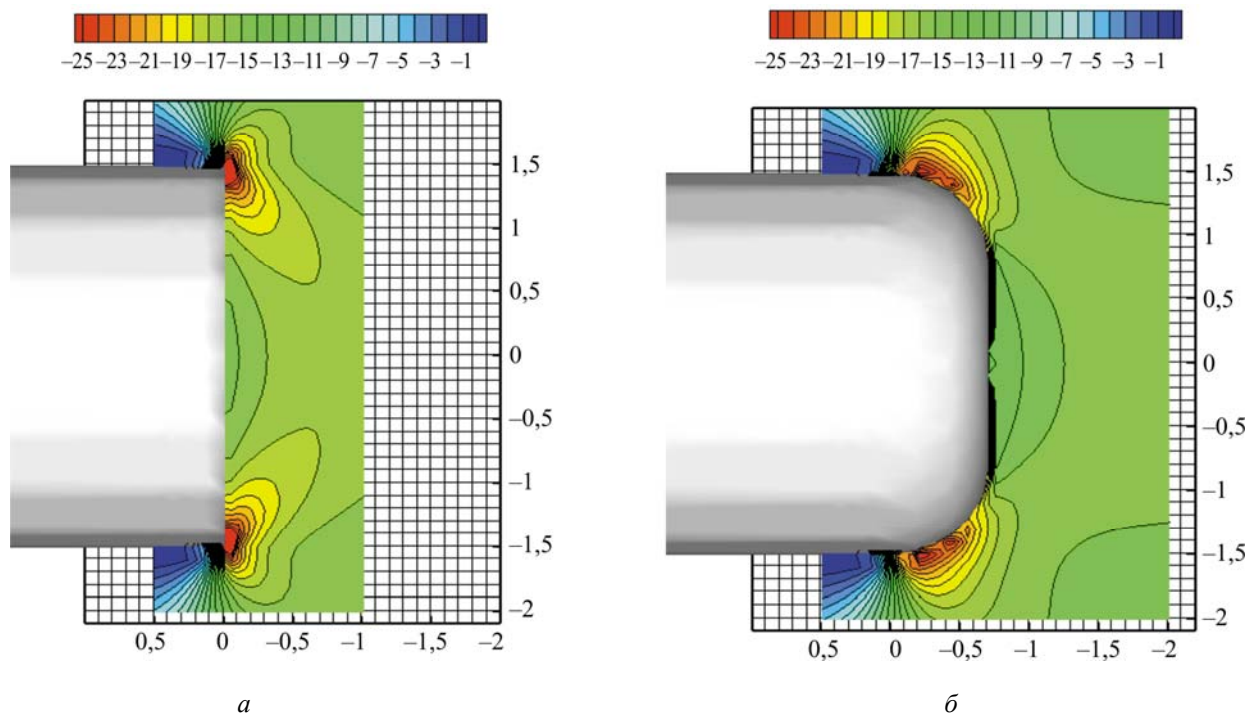


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений (МПа) в вертикальном сечении забоя для выработок с плоской (а) и вогнуто-плоской (б) формами забоя

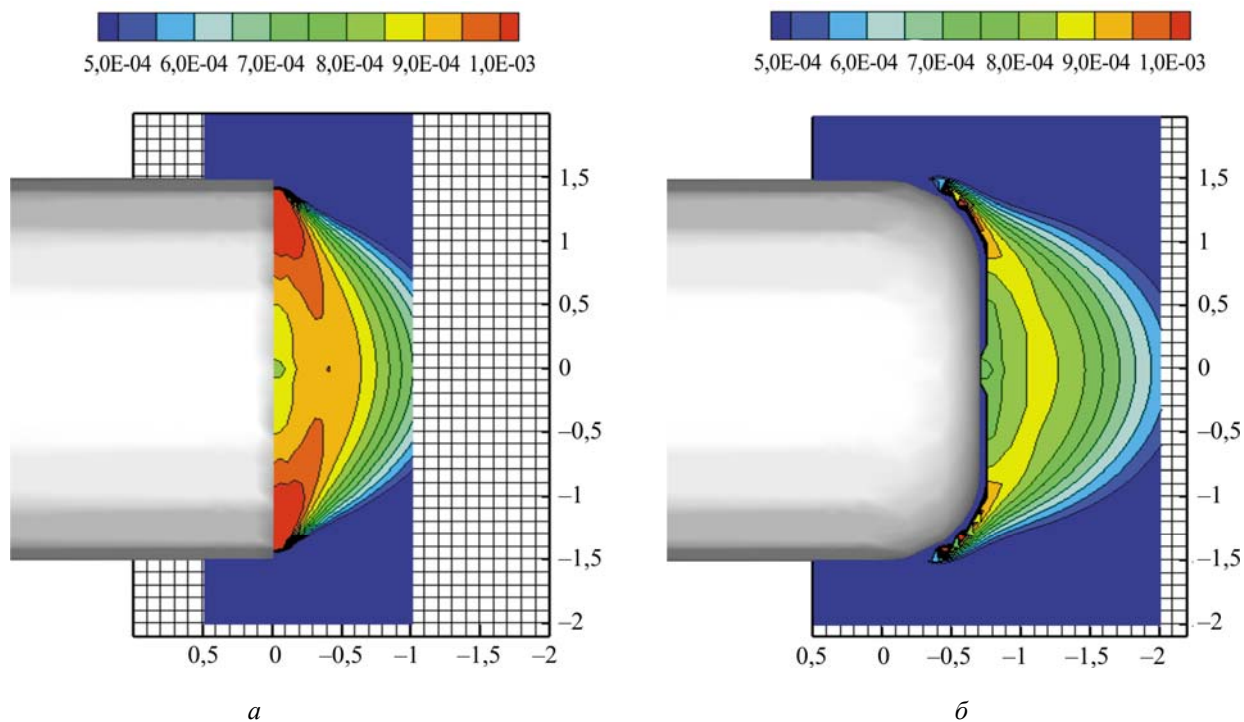


Рис. 3. Распределение горизонтальных (перпендикулярных забою) растягивающих деформаций в вертикальном сечении забоя для выработок с плоской (а) и вогнуто-плоской (б) формами забоя

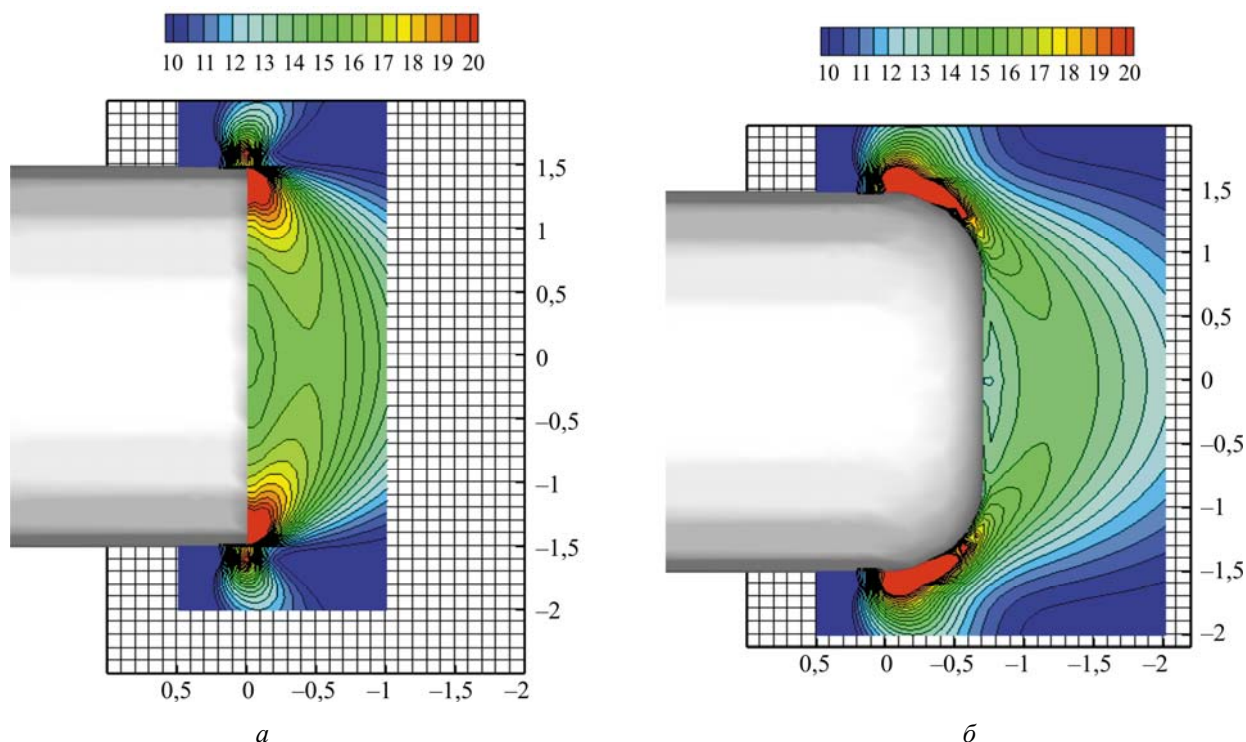


Рис. 4. Распределение максимальных касательных напряжений (МПа) в вертикальном сечении забоя для выработок с плоской (а) и вогнуто-плоской (б) формами забоя

находится под действием сжимающих напряжений. В этих условиях способность пород к потере устойчивости в значительной степени определяется уровнем действующих касательных напряжений. На рис. 4 показано распределение максимальных касательных напряжений в вертикальном сечении забоя для выработок с плоской и вогнуто-плоской формой забоя. Максимальные касательные напряжения аналогично горизонтальным растягивающим напряжениям достигают максимальных значений на поверхности в форме линзы, примыкающей к забою. При этом вогнутая форма забоя по сравнению с плоской снижает максимальные касательные напряжения на оси выработки на 15–17 %, а область концентрации напряжений, расположенная по периметру забоя, смещается за грудь забоя, тем самым снижая максимальные напряжения впереди забоя на 40–45 %.

Анализ запредельного состояния пород в окрестности как плоского, так и вогнуто-плоского забоя показал, что критерий разрушения в окрестности забоя плоской и вогнуто-плоской формы не выполняется. Таким образом, согласно полученным результатам математического мо-

делирования напряженно-деформированного состояния, вогнуто-плоская форма забоя одиночной выработки обуславливает значительно более устойчивое состояние горного массива впереди забоя за счет существенного снижения уровня действующих в массиве напряжений и деформаций, опасных с точки зрения развития газодинамических явлений в виде отжимов призабойной части пород.

Моделирование напряженно-деформированного состояния в окрестности забоя плоской и вогнуто-плоской форм в случае параллельной забою тектонической трещины

Детальный анализ случаев отжимов призабойной части пород показал, что все они приурочены к тектоническим трещинам [4]. Раскрытие трещин в местах отжимов изменяется от 0,01 до 0,03 м, достигая порой 0,05 м. Трещины, как правило, залеченные, однако отмечались открытые геологические трещины с раскрытием 0,01–0,015 м, которые прослеживались от полостей отжимов вглубь массива на расстояние до 2,0 м. По углам падения в породах третьего калийного пласта преобладают

нормально секущие и крутые тектонические трещины, поэтому моделирование проводилось для случаев нормально секущих трещин.

Результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния пород в случае трещины без газа показали, что в окрестности плоского и вогнуто-плоского забоя не создается условий для запредельного деформирования пород при любых положениях трещины. В связи с этим дальнейший сравнительный анализ геомеханического состояния в окрестности плоского и вогнуто-плоского забоя проводился для трещин с газом под давлением 5 МПа. Величина давления свободного газа в трещине принималась по результатам замеров давления газа в натуральных условиях. При моделировании трещина задавалась как объект нулевой толщины с соответствующими граничными условиями на каждом берегу трещины. Характерные размеры трещин превышали диаметр выработки в 8–10 раз.

Анализ напряженно-деформированного состояния пород в окрестности забоя в случае параллельной забоя трещины с газом под давлением 5 МПа показал, что для плоского забоя область запредельного состояния, построенная по комплексному критерию Кулона, в значительной степени охватывает породы между забоем и трещиной на расстоянии до трещины, не превышающем 0,5–0,6 м, т.е. в этом случае создаются предпосылки для развития газодинамического явления в виде внезапного отжима призабойной части пород (рис. 5, а, б). В случае вогнуто-плоского забоя данные условия реализуются лишь на расстоянии до трещины, равном 0,3 м (рис. 5, в–е).

Следует отметить, что для обеих форм забоя области запредельного состояния, охватывающие всю толщину слоя от забоя до трещины, формируются вблизи стенок выработок. Область запредельного состояния реализуется главным образом за счет действия растягивающих напряжений, превышающих предел прочности породы на растяжение и действующих вдоль поверхности обнажения, которые создают благоприятные условия для зарождения и роста трещин, перпендикулярных забоя

и, соответственно, нарушающих целостность породной перемычки между забоем и трещиной. В данном случае в результате потери устойчивости перемычки между забоем и трещиной возможно резкое развитие деформаций упругого восстановления, а выделившаяся при этом упругая энергия и энергия сжатого газа расходуется на развитие газодинамического явления в виде отжима призабойной части пород. При достаточной энергии сжатого газа отжиму пород из забоя может сопутствовать вынос разрушенной породы и газа в выработку. Как видно из рис. 5, наиболее вероятное место выноса разрушенной породы из забоя – вблизи стенок выработки.

Вынос разрушенной породы и газа будет развиваться по нормали к обнаженной поверхности, по наискратчайшему пути от трещины до забоя. Таким образом, в случае плоского забоя вынос разрушенной породы и газа будет происходить вдоль оси выработки, а в случае вогнуто-плоского забоя – к центру выработки в направлении рабочего органа проходческого комбайна.

Анализ напряженно-деформированного состояния показывает, что перпендикулярные забоя деформации и максимальные касательные напряжения достигают максимальных значений на поверхности в форме линзы, примыкающей к забоям (рис. 6, 7). Для плоского забоя линза охватывает весь забой, а для вогнутого – только плоскую его часть, т.е. площадь в 3–4 раза меньшую. Принимая во внимание то, что поперечный размер породной перемычки между забоем и трещиной в случае вогнуто-плоского забоя меньше в 1,5–2,0 раза по сравнению с плоским, получаем, что возможный объем отжатой породы при газодинамическом явлении из забоя вогнуто-плоской формы будет в 5–8 раз меньше, чем из забоя с плоской формой.

Таким образом, результаты моделирования напряженно-деформированного состояния в окрестности забоя, впереди которого расположена параллельная ему трещина с газом, показали, что вогнуто-плоская форма забоя по сравнению с плоской значительно снижает как возможный объем отжатой породы, так и опасность травмирования шахтеров разлетающимися кусками породы.

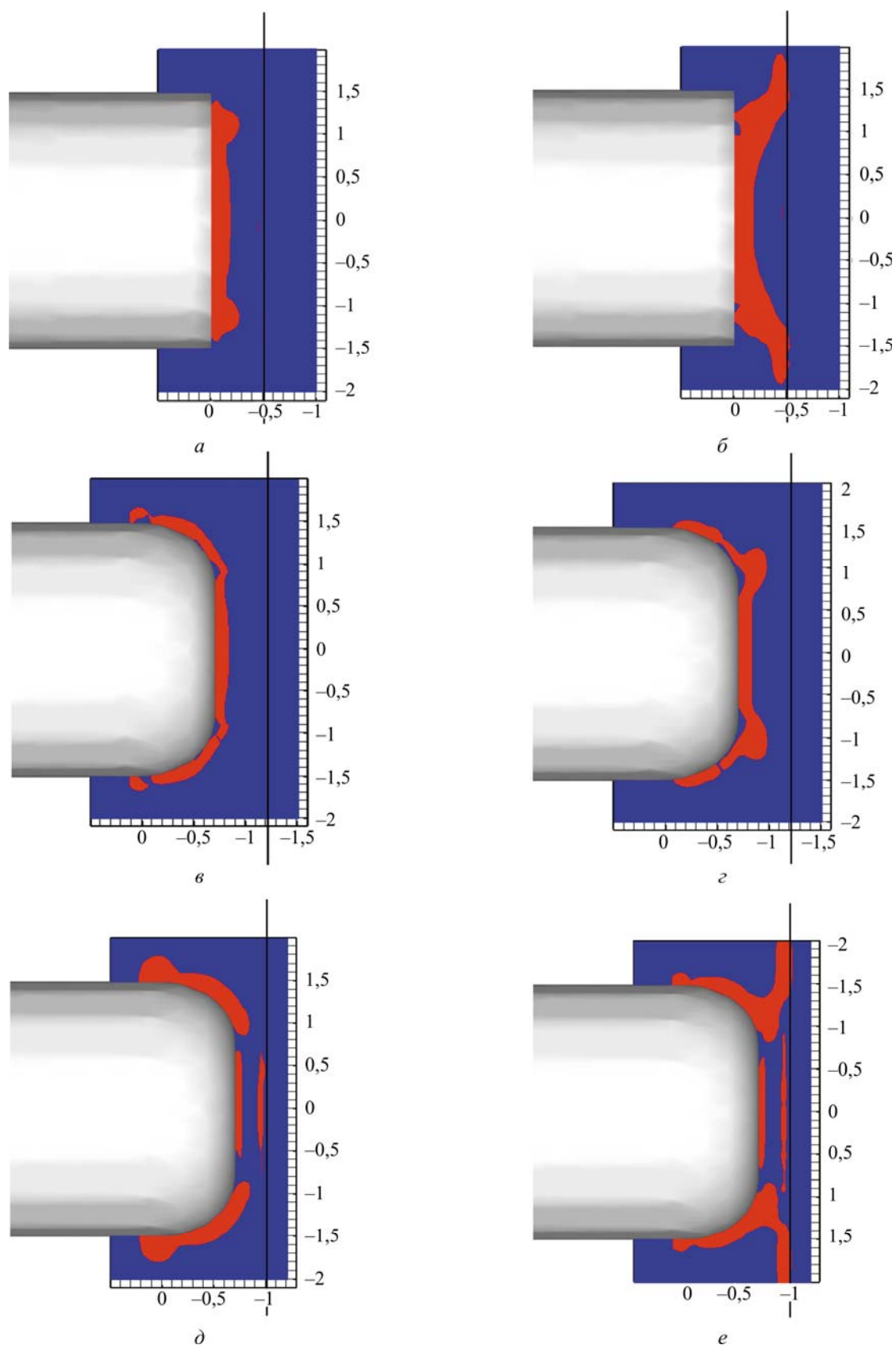


Рис. 5. Области запредельного деформирования в вертикальном (*а, в, д*) и горизонтальном (*б, г, е*) сечении забоя в случае параллельной забою трещины с газом под давлением 5 МПа: *а, б* – плоская форма забоя, расстояние до трещины 0,5 м; *в, г* – вогнуто-плоская форма забоя, расстояние до трещины 0,5 м; *д, е* – вогнуто-плоская форма забоя, расстояние до трещины 0,3 м

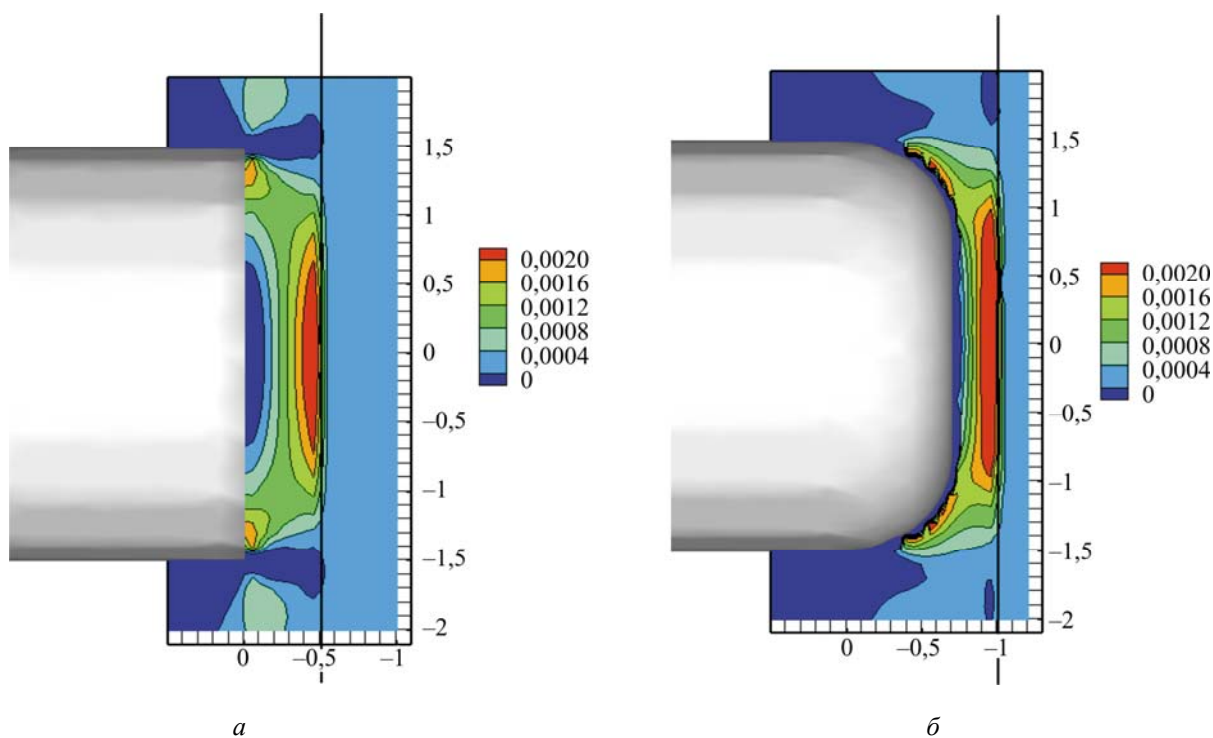


Рис. 6. Распределение горизонтальных (перпендикулярных забою) растягивающих деформаций в вертикальном сечении забоя в случае параллельной забою трещины с газом под давлением 5 МПа: *а* – плоская форма забоя, расстояние до трещины 0,5 м; *б* – вогнуто-плоская форма забоя, расстояние до трещины 0,3 м

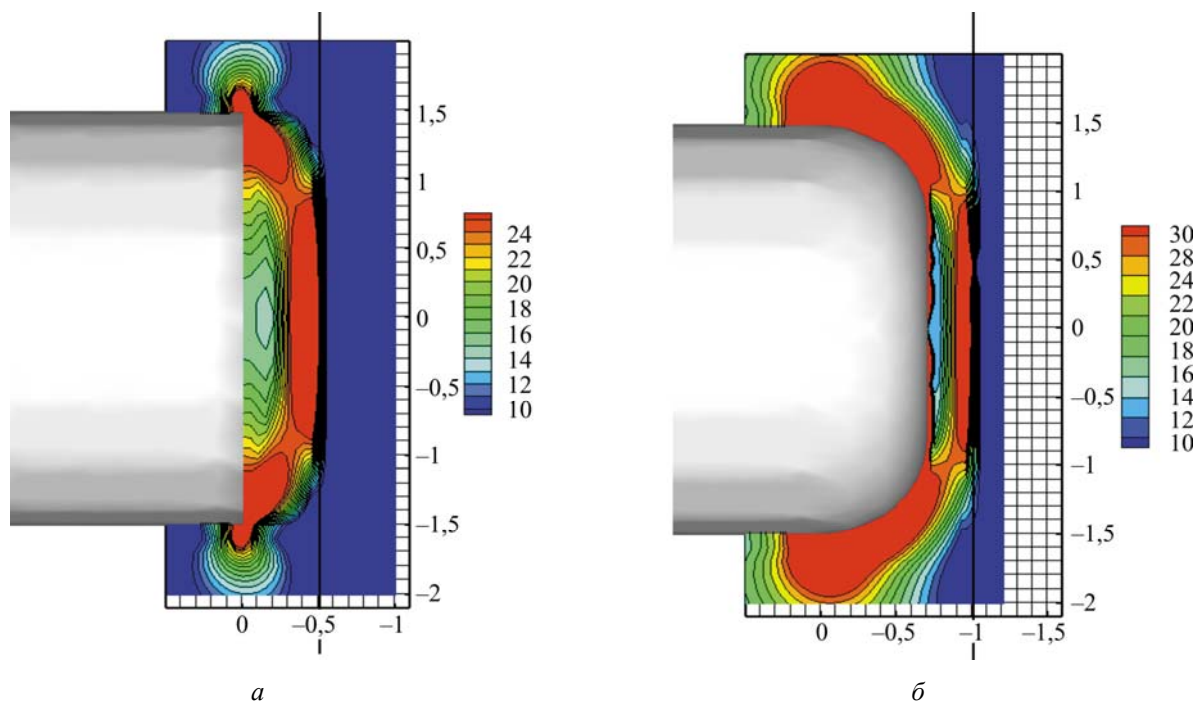


Рис. 7. Распределение максимальных касательных напряжений (МПа) в вертикальном сечении забоя в случае параллельной забою трещины с газом под давлением 5 МПа: *а* – плоская форма забоя, расстояние до трещины 0,5 м; *б* – вогнуто-плоская форма забоя, расстояние до трещины 0,3 м

Выводы

Результаты пространственного математического моделирования напряженно-деформированного состояния пород в окрестности забоя плоской и вогнуто-плоской форм позволяют сделать следующие выводы.

1. Пространственное моделирование напряженно-деформированного состояния в окрестности забоя выработки, пройденной в соляном породном массиве, позволило установить, что управление газодинамическими явлениями в виде внезапных отжимов призабойной части пород может осуществляться путем выбора рациональной формы забоя. Установлено, что вогнуто-плоская форма забоя по сравнению с плоской обеспечивает более устойчивое со-

стояние соляного породного массива впереди забоя за счет существенного снижения уровня действующих в массиве напряжений и деформаций.

2. Установлено, что вогнуто-плоская форма забоя обеспечивает снижение уровня действующих в массиве напряжений соответственно максимальных касательных по оси выработки – на 15–20 % и максимальных касательных впереди забоя – на 40–45 %, а также позволяет уменьшить в 5–8 раз объем разрушенной породы и направить газосолевой поток к центру выработки на исполнительный орган комбайна, что исключает травмирование шахтеров кусками породы и частями щита ограждения, разрушающегося, как правило, при внезапных отжимах призабойной части пород.

Список литературы

1. Проскуряков Н.М., Ковалев О.В., Мещеряков В.В. Управление газодинамическими процессами в пластах калийных руд. – М.: Недра, 1988. – 239 с.
2. Ковалев О.В., Ливенский В.С., Былино Л.В. Особенности безопасной разработки калийных месторождений. – Минск: Полымя, 1982. – 96 с.
3. Проскуряков Н.М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках. – М.: Недра, 1980. – 263 с.
4. Проскуряков Н.М. Управление состоянием массива горных пород. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
5. Проскуряков Н.М., Ковалев О.В., Мещеряков В.В. Управление газодинамическими процессами в пластах калийных руд. – М.: Недра, 1988. – 239 с.
6. Зорин А.Н. Управление динамическими проявлениями горного давления. – М.: Недра, 1978. – 175 с.
7. Зорин А.Н., Долинина Н.Н. Управление гетерогенным упруго-наследственным горным массивом. – Киев: Наукова думка, 1981. – 285 с.
8. Прогноз и предотвращение выбросов пород и газа / В.Н. Потураев, А.Н. Зорин, В.Е. Забигайло [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1986. – 160 с.
9. Андрейко С.С., Некрасов С.В. Алгоритм решения неоднородной трехмерной упругой задачи непрямым методом граничных элементов // Известия вузов. Горный журнал. – 2004. – № 1. – С. 26–29.
10. Banerjee P.K. Integral equation methods for analysis of piecewise nonhomogeneous three-dimensional elastic solids of arbitrary shape // Int. J. Mech. Sci. – 1976. – Vol. 18. – P. 293–303.
11. Banerjee P.K., Butterfield R. Boundary element methods in geomechanics // Finite elements in geomechanics / ed. by G. Gudehus. – London: Wiley, 1977.

References

1. Proskuriakov N.M., Kovalev O.V., Meshcheriakov V.V. Upravlenie gazodinamicheskimi protsessami v plastakh kaliinykh rud [Management of gas dynamic processes in potash ore seams]. Moscow: Nedra, 1988. 239 p.
2. Kovalev O.V., Livenskii V.S., Byliny L.V. Osobennosti bezopasnoi razrabotki kaliinykh mestorozhdenii [Features of safe development of potash deposits]. Minsk: Polymia, 1982. 96 p.
3. Proskuriakov N.M. Vnezapnye vybrosy porody i gaza v kaliinykh rudnikakh [Sudden emissions of rock and gas in the potash mines]. Moscow: Nedra, 1980. 263 p.
4. Proskuriakov N.M. Upravlenie sostoianiem massiva gornyx porod [Management of the rock massif state]. Moscow: Nedra, 1991. 368 p.
5. Proskuriakov N.M., Kovalev O.V., Meshcheriakov V.V. Upravlenie gazodinamicheskimi protsessami v plastakh kaliinykh rud [Management of gas dynamic processes in potash ore seams]. Moscow: Nedra, 1988. 239 p.
6. Zorin A.N. Upravlenie dinamicheskimi proiavlenniami gornogo davleniia [Management of dynamic displays of rock pressure]. Moscow: Nedra, 1978. 175 p.
7. Zorin A.N., Dolinina N.N. Upravlenie geterogennym uprugonasledstvennym gornym massivom [Management of heterogeneous elastic-hereditary rock massif]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 285 p.
8. Poturaev V.N., Zorin A.N., Zabigailo V.E. et al. Prognoz i predotvrashchenie vybrosov porod i gaza [Prediction and prevention of rock and gas emissions]. Kiev: Naukova dumka, 1986. 160 p.
9. Andreiko S.S., Nekrasov S.V. Algoritm resheniia neodnorodnoi trekhmernoii uprugoi zadachi nepriamym metodom granichnykh elementov [The algorithm for solving non-homogeneous three-dimensional elastic problem by indirect boundary element method]. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2004, no. 1, pp. 26-29.

12. Tomlin G.R., Butterfield R. Elastic analysis of zone orthotropic continua // *Proc. ASCE. – Engng Mech. Div.* – 1974. – Vol. EM3. – P. 511–529.
13. Oliveira E.R. Plane stress analysis by a general integral method // *J. ASCE. Eng. Mech. Div.* – 1968. – Febr. – P. 79–85.
14. Watson J.O. Analysis of thick shells with holes by using integral equation method: Ph.D. thes. – Southampton Univ, 1973.
15. Jaswon M.A., Symm G.T. Integral equation methods in potential theory and elastostatics. – London: Academic Press, 1977.
16. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
17. Бонерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
10. Banerjee P.K. Integral equation methods for analysis of piecewise nonhomogeneous three-dimensional elastic solids of arbitrary shape. *Int. J. Mech. Sci.*, 1976, vol. 18, pp. 293-303.
11. Banerjee P.K., Butterfield R. Boundary element methods in geomechanics. In: *Finite elements in geomechanics*. Ed. by G. Gudehus. London: Wiley, 1977.
12. Tomlin G.R., Butterfield R. Elastic analysis of zone orthotropic continua. *Proc. ASCE. – Eng. Mech. Div.*, 1974, vol. EM3, pp. 511-529.
13. Oliveira E.R. Plane stress analysis by a general integral method. *J. ASCE. Eng. Mech. Div.*, 1968, febr., pp. 79-85.
14. Watson J.O. Analysis of thick shells with holes by using integral equation method: Ph.D. thes. Southampton Univ, 1973.
15. Jaswon M.A., Symm G.T. Integral equation methods in potential theory and elastostatics. London: Academic Press, 1977.
16. Krauch S., Starfild A. Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela [Boundary element methods in solid medium mechanics]. Moscow: Mir, 1987. 328 p.
17. Benerdzhi P., Batterfild R. Metod granichnykh elementov v prikladnykh naukakh [Boundary element method in applied sciences]. Moscow: Mir, 1984. 494 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Андрейко С.С. Геомеханическое обоснование применения вогнуто-плоской формы забоя горной выработки для управления внезапными отжимами призабойной части пород // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №18. – С. 80–90. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.9

Please cite this article in English as:

Andreiko S.S. Geomechanical justification of the application of concave-flat shape of mine excavation stope face to control sudden rock spalling. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol.15, no.18, pp. 80-90. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.9