

УДК 622.831.32:004.94

**Пугач Александр Сергеевич**

старший преподаватель кафедры ФизГео,  
НИТУ «МИСиС»,  
119049 г. Москва,  
Ленинский пр-т, д.4, стр.1  
e-mail: [as.pugach@misis.ru](mailto:as.pugach@misis.ru)

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГОРНЫХ УДАРОВ

### Аннотация:

Рассмотрены особенности прогнозирования горных ударов на основе применения компьютерного моделирования. В модели представлено Воркутское месторождение, разработка которого осложнена горно-геологическими условиями и влиянием тектоники, создающими предпосылки для формирования начального поля напряжений. Произведен анализ того, как напряженно-деформированное состояние массива сказывается в проявлении горных ударов, на основании чего предложена методика их прогнозирования, включающая рассмотрение модели упрочняющегося массива. Угольный пласт в этом случае представляет пластичным материалом. Непосредственно в угольном пласте образуются переходные зоны текучести, изменяющие свое состояние с течением времени и играющие роль в создании максимумов пределов текучести, вносящие дополнительный вклад в перераспределение напряжений, а также зоны упрочнения, выражаемые через полиномы высших порядков при описании напряженного состояния. Расчетная модель включает несколько комбинаций модуля деформации и коэффициента Пуассона в диапазоне  $0,8E_{\text{ср}} \dots 1,2E_{\text{ср}}$  и  $0,8\nu_{\text{ср}} \dots 1,2\nu_{\text{ср}}$ , где  $E_{\text{ср}}$  и  $\nu_{\text{ср}}$  – усредненные значения, определяемые лабораторными способами. Полученные расчетные значения выражены в главных напряжениях. Для значений в точках горных ударов (согласно планам горных работ) и в указанных нейтральных точках, где горных ударов не наблюдалось, рассчитана плотность числа реализации значений напряжений. Для каждого из этих случаев распределение плотностей числа реализаций носит различный характер. В точках, соответствующих горным ударам, существуют предпосылки к резкому изменению напряженного состояния при образовании поверхности обнажения, в то время как в остальных точках есть предпосылки к постепенному снижению напряженности. Такая модель позволяет устанавливать причинно-следственные связи. Полученное решение не противоречит практике ведения горных работ и может найти отражение в рамках регионального прогноза.

**Ключевые слова:** горный удар, напряженно-деформированное состояние, начальное поле напряжений, геомеханические процессы, дилатансия, компьютерное моделирование, модель уплотняющейся среды, пластичность.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.01.025

**Pugach Aleksandr S.**

Senior Lecturer of the Department  
of FizGeo, NUST "MISIS",  
119049 Moscow, 4/1 Leninsky Av.  
e-mail: [as.pugach@misis.ru](mailto:as.pugach@misis.ru)

## COMPUTER SIMULATION OF THE INITIAL STRESS FIELD FOR ROCK BURST PREDICTION

### Abstract:

The article discusses the features of rock burst prediction based on the use of computer simulation. The model represents the Vorkuta deposit, the development of which is complicated by mining and geological conditions and the influence of tectonics, which create prerequisites for the formation of an initial stress field. An analysis was made of how the stress-strain state of the massif affects the manifestation of rock bursts, based on which we propose a method for predicting them, including the model of a hardening massif. The coal layer in this case is a plastic material. Transitional yield zones are formed directly in the coal seam, which change their state over time and play a role in creating yield strength maxima, making an additional contribution to the redistribution of stresses, as well as hardening zones, expressed through higher-order polynomials when describing the stress state. The calculation model includes several combinations of the deformation modulus and Poisson's ratio in the range of  $0.8E_{\text{mean}} \dots 1.2E_{\text{mean}}$  and  $0.8\nu_{\text{mean}} \dots 1.2\nu_{\text{mean}}$ , where  $E_{\text{mean}}$  and  $\nu_{\text{mean}}$  are average values determined by laboratory methods. The calculated values obtained are expressed in principal stresses. For values at the points of rock bumps (according to mining plans) and at the indicated neutral points, where rock bumps were not observed, the density of the number of realization of stress values was calculated. For each of these cases, the distribution of probability densities has a different character. At the points corresponding to rock bumps, there are prerequisites for a sharp change in the stress state during the formation of the outcrop surface, while at other points there are prerequisites for a gradual decrease in tension. This model allows us to establish causal relationships. The resulting solution does not contradict the practice of mining operations and can be reflected in the regional forecast.

**Key words:** rock bump, stress-strain state of rock massif, initial stresses field, geomechanical processes, dilatancy, potential energy of deformation, computer modeling, hardening model, plasticity.

## Введение

При разработке глубоких горизонтов угольных шахт одной из опасностей являются горные удары. С увеличением глубины ведения горных работ вероятность их проявления повышается, для оценки этой вероятности необходимо иметь строгие теоретические представления о процессах, приводящих к возникновению горных ударов. Исследование этих процессов основывается на моделировании напряженно-деформированного состояния массива. По характеру поля напряжений выявляют общие закономерности, на основании которых можно судить о возможности проявления горного удара. Наиболее распространенным и удобным способом современного моделирования является построение компьютерных моделей. Построение такой модели и рассмотрено в данной статье.

Как правило, при создании компьютерной модели, позволяющей спрогнозировать горные удары, входными параметрами являются усредненные значения физических свойств вмещающих пород и угольного пласта, не учитывающие возможный диапазон их изменения. Учет достаточно широких диапазонов изменения физических свойств, закладываемых в модель, потребует производить расчеты для различных комбинаций последних, анализировать большое количество решений с целью выявления особенностей напряженно-деформированного состояния массива вблизи очагов возникновения горных ударов.

Целью, которую преследует автор статьи, является обоснование возможности взаимоувязки фактических проявлений горных ударов и значений главных напряжений, получаемых в результате компьютерного моделирования начального поля напряжений в условиях тектонических нарушений. Зная эту связь, в дальнейшем можно будет прогнозировать предпосылки, приводящие к возникновению горных ударов.

### *Постановка задачи компьютерного моделирования*

В соответствии с целью осуществим постановку задачи. Рассмотрим мульдугу Воркутского месторождения Печорского угольного бассейна. Исследуемый участок представлен полями шахт «Комсомольская», «Северная», «Заполярная» и «Воркутинская». Этот участок осложнен тектоническими нарушениями «В», «Д», «Д-Е», «Д<sub>2</sub>», «Д<sub>3</sub>», «е<sub>2</sub>», «Е», «Ж», «Ж-Л», «Ж-Л<sub>3</sub>», «Л», «Л<sub>2</sub>». Основой для расчетов служат утвержденная дирекцией АО «Воркутауголь» техническая документация каждого из обозначенных предприятий и паспорта ведения горных работ.

В условиях данной задачи требуется оценить напряженно-деформированное состояние угольного пласта «Тройной» в начальном поле напряжений с учетом его тектонической нарушенности. Пласт располагается на глубине свыше 1000 м и относится к удароопасным пластам. Следует решить ряд задач с применением компьютерного моделирования. При этом решение осуществляется при различных комбинациях модуля деформации  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ . Значения указанных физических свойств определяются случайным образом в MathCad через функцию rnd() в диапазоне  $0,8E_{cp} \dots 1,2E_{cp}$  и  $0,8\nu_{cp} \dots 1,2\nu_{cp}$ , соответственно. Здесь  $E_{cp}$  и  $\nu_{cp}$  – усредненные значения, взятые из данных лабораторных испытаний образцов [1]. Из рассматриваемых диапазонов формируется 200 случайных комбинаций  $E$ - $\nu$ , затем осуществляется решение задач. Осуществив решение поставленных задач, необходимо сопоставить главные напряжения в точках, где наблюдались горные удары, и в нейтральных точках с целью выявления общих закономерностей. Представляется возможным на основании различий характера поведения в этих точках обосновать предпосылки проявлений горных ударов. Рассмотреть совокупность решений в интересующих нас точках возможно с помощью оценки плотности числа реализации главных напряжений. В качестве программного комплекса для компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния угольно-породного массива применяется Plaxis 8.2, позволяющий решать задачи геомеханики. Расчеты основаны на методе конечных элемен-

тов, средний размер элемента порядка 400 м, сетка элементов – треугольная. В областях с наиболее изменяемой геометрией, в узлах дизъюнктивов и в зоне непосредственно дизъюнктивов применяется более густая сетка элементов. Между крупной сеткой элементов и густой осуществляется интерполяция размеров элементов для более плавного перехода. Размер моделируемой области – 12000 м × 8500 м, 2183 элемента, 26208 расчетных точек, в каждой из которых определяется тензор напряжений.

За основу исследования принято обоснование начального поля напряжений, на формирование которого влияют тектонические нарушения. Определены точки, в которых при ведении горных работ происходили горные удары, и точки, в которых горных ударов не наблюдалось. При этом на первой стадии изучения нас интересует начальный характер поля напряжений до ведения горных работ в обозначенных точках, чтобы проследить специфику изменения напряженно-деформированного состояния. Также были поставлены и решены задачи с учетом изменения фронта развития горных пород. Результаты этих исследований, где показано технологическое воздействие горных выработок и их сопоставление с результатами, опубликованными в настоящей статье, являются темой следующей публикации.

В основу решений заложен следующий механизм разрушения угольного пласта и вмещающего массива. Исследования показывают, что параметры структурного разрушения породно-угольного массива определяются в основном свойствами угольного пласта [2], поведение которого следует рассматривать как поведение пластического геоматериала. Для построения моделей принят ряд допущений, следующих на основании расчетных моделей из предыдущих работ автора [3]: обусловлена возможность моделирования в горизонтальной плоскости (в плоскости угольного пласта), не учитывается угол наклона рассматриваемого пласта и перепады высот, рассматривается набор однородных свойств при фактическом проявлении физических свойств из расширенного диапазона. В связи с этим применяется модель упрочняющегося массива, приближающая результаты расчетов к реальным условиям. Эта модель содержится в выбранном программном комплексе.

Модель упрочняющегося массива является более совершенной моделью в сравнении с известной идеализированной упруго-пластической моделью Кулона-Мора. В предлагаемой модели в дополнение к таким физическим свойствам, как коэффициент Пуассона  $\nu$ , сцепление  $C$ , угол внутреннего трения  $\varphi$  и угол дилатансии  $\psi$ , вводятся следующие параметры, характеризующие деформируемость: секущий модуль деформации при трехосном нагружении  $E_{50}$ , модуль деформации при нагружении в одометре  $E_{oed}$ , то есть при исключении возможности расширения образца, и разгрузочный модуль деформации  $E_{ur}$  [4]. Перечисленные модули деформации связаны между собой с помощью коэффициента  $K_0$ , представляющего отношение сил в поперечном и продольном направлениях относительно определения свойств в образце горных пород при лабораторных испытаниях. При переходе на массив данные значения корректируются с учетом применяемой модели упрочнения, которая рассматривает изменение модулей деформаций в виде степенной функции. Также переход на массив (зоны упрочнения/зоны ослабления по отношению к свойствам, получаемым в лабораторных условиях) возможен с учетом диапазона изменения свойств в зависимости от среднего значения. Данный принцип основан на аналогии с рекомендациями ввода коэффициента изменчивости прочности угля в нормативной документации и Инструкциях по правилам безопасности [5].

Физический смысл предлагаемой модели заключается в следующем. Рассматривается два механизма упрочнения массива (за счет действия касательных напряжений и за счет действия сжимающих напряжений), реализующие два взаимно противоположных процесса. При разрушении может происходить пластическое разрыхление, которое в свою очередь приводит к образованию нового порово-трещинного пространства с закономерным уменьшением угла внутреннего трения  $\varphi$  и сцепления  $C$ . С другой сторо-

ны, за счет упрочнения массива в результате действующих нагрузок на пластическом этапе разрушения происходит закрытие пор, обуславливающее рост угла внутреннего трения  $\phi$  и сцепления  $C$ . Пластичность (текучесть) сказывается в том, что в точках, соответствующих угольному пласту, рассматривается накопление пластических деформаций. В математический аппарат Plaxis 8.2 заложены уравнения, входящие в классическую теорию упрочняющегося пластического тела [6]. Таким образом, в расчетах учитывается нелинейное описание напряженного состояния, характерное для учета свойств текучести. Кроме того, с увеличением глубины разрабатываемых горизонтов модули деформаций имеют тенденцию к росту. На изменение физических свойств оказывает влияние и то, на какой стадии деформирования находится исследуемый материал массива [7], и то, какой характер имеет протекающий процесс – первоначальная нагрузка, разгрузка или повторное нагружение. Таким образом, модель упрочняющегося массива учитывает еще и зависимость напряжений от модуля деформации.

На рис. 1 изображен моделируемый в плоскости пласта (горизонтальном сечении) участок Воркутского угольного месторождения с нанесенными в соответствии с планами горных работ очагами горных ударов.

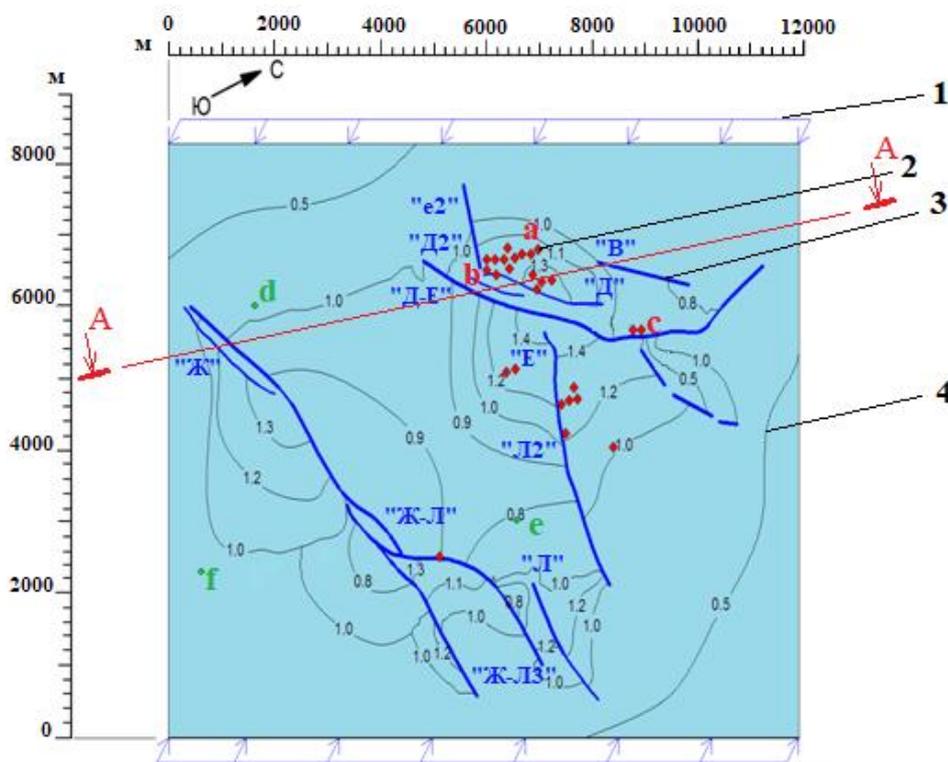


Рис. 1. Модель участка угольного пласта, разрабатываемого шахтами Воркутского месторождения:

- – нейтральные точки, ◆ – очаги произошедших горных ударов
- 1 – направление действия тектонических горизонтальных напряжений;
- 2 – очаги произошедших горных ударов; 3 – дизъюнктивные нарушения;
- 4 – отношение горизонтальных напряжений к вертикальным (коэффициент бокового давления)

Тектонические нарушения задаются геометрическими построениями. Берега сместителя при сдвиге подвержены трению, поэтому материал, заполняющий разлом, моделируется с помощью уменьшения значений физических свойств: угла внутреннего трения, сцепления, модулей деформации. Контуры и границы тектонических нарушений принимаются в соответствии с планами горных работ, выполняемыми маркшейдерскими службами предприятия.

Направление действия и величину горизонтальных сил помимо теории распределения А. Н. Динника определяем с учетом выявленных опасных зон ВНИМИ (рис. 2). Эти данные были получены также при отсутствии ведения горных работ.

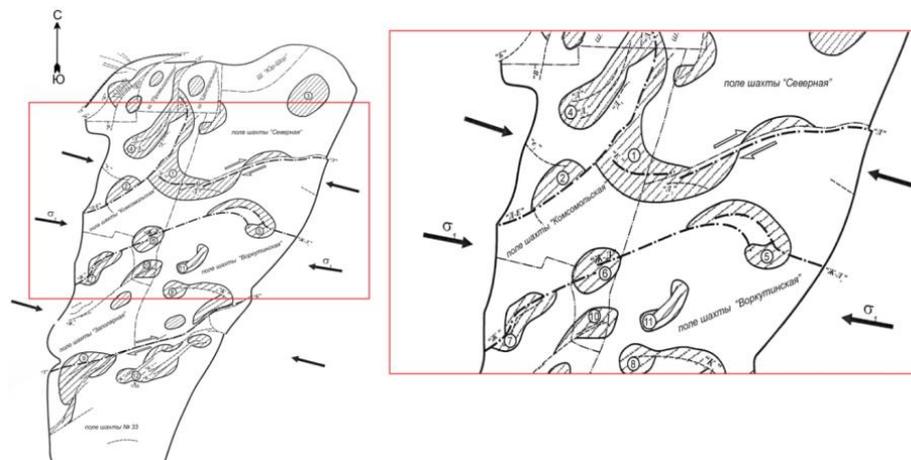


Рис. 2. Тектонически опасные зоны, определенные ВНИМИ

Направление горизонтальных сил определялось путем решения обратных задач с различными направлениями таким образом, чтобы получаемые опасные зоны накладывались на опасные зоны, выявленные ВНИМИ. Опасность определялась из соотношения главных напряжений (вертикальных  $\sigma_v$  напряжений, горизонтальных максимальных  $\sigma_n$  и горизонтальных минимальных  $\sigma_h$  напряжений), которые и определяют характер нарушения [9].

В вертикальных сечениях разлом представляет разрыв, идущий от поверхности вглубь массива. Среда претерпевает изменения под действием гравитационного литостатического сжатия, а со стороны тектонической составляющей горного давления – кроме сжатия, еще и сдвига.

С увеличением глубины возрастают силы трения, сдерживающие рост дизъюнктива. Эпицентр разрушения примыкает к устью разлома.

Процесс разрушения связан с начальной глубиной заложения разрыва, трещиностойкостью среды и активным напряжением тектонического сдвига [8].

В компьютерную модель вносим геологические нарушения, такие как сбросы, взбросы, грабены, перегибы пласта, бифуркация (рис. 3, 4).

На рис. 3 показано распределение касательных напряжений  $\tau_{xy}$  на вертикальном разрезе по линии А-А, пересекающей наибольшее количество разломов (см. рис. 1). На рис. 4 показано распределение нормальных напряжений  $\sigma_y$  на вертикальном разрезе также по линии А-А. Линия Б-Б – сечение в плоскости угольного пласта, позволяющее перейти к рис. 1.

Анализируя распределение касательных и нормальных напряжений на вертикальном разрезе, делаем вывод, что для численного метода моделирования МКЭ значения несущественно зависят от перепада высот и геометрии пласта Тройного ( $n_{14+13+12}$ ). Пласт находится в зоне действия напряжений, равных 31 – 38 МПа, что составляет 5 - 6 % от предела прочности песчаника на сжатие. Рассмотрение дальнейших задач производится в плоскости угольного пласта Тройного. При этом вводим два допущения: 1) возможность косвенно учитывать при расчетах вертикальную составляющую горного давления  $\gamma H$  (она характеризуется уровнем напряжений в зоне расположения угольного пласта, а не вносится в модель как действие вышележащих горных пород); 2) не учитывается угол наклона рассматриваемого угольного пласта, перепады высот, бифуркация и угол наклона тектонических нарушений. Дальнейшие решения производим в плоскости угольного пласта (см. рис. 1).

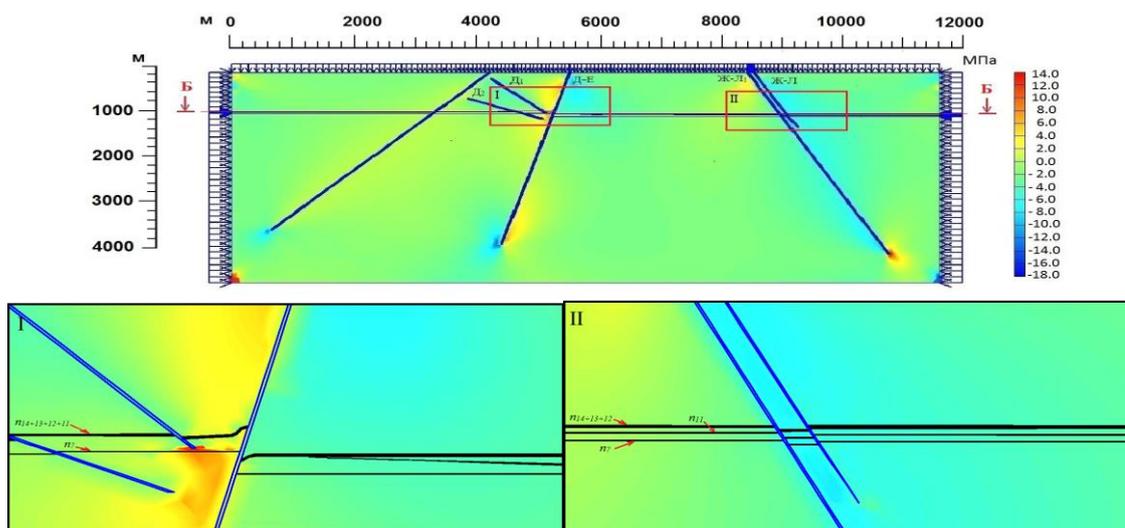


Рис. 3. Распределение касательных напряжений с учетом тектонической нарушенности

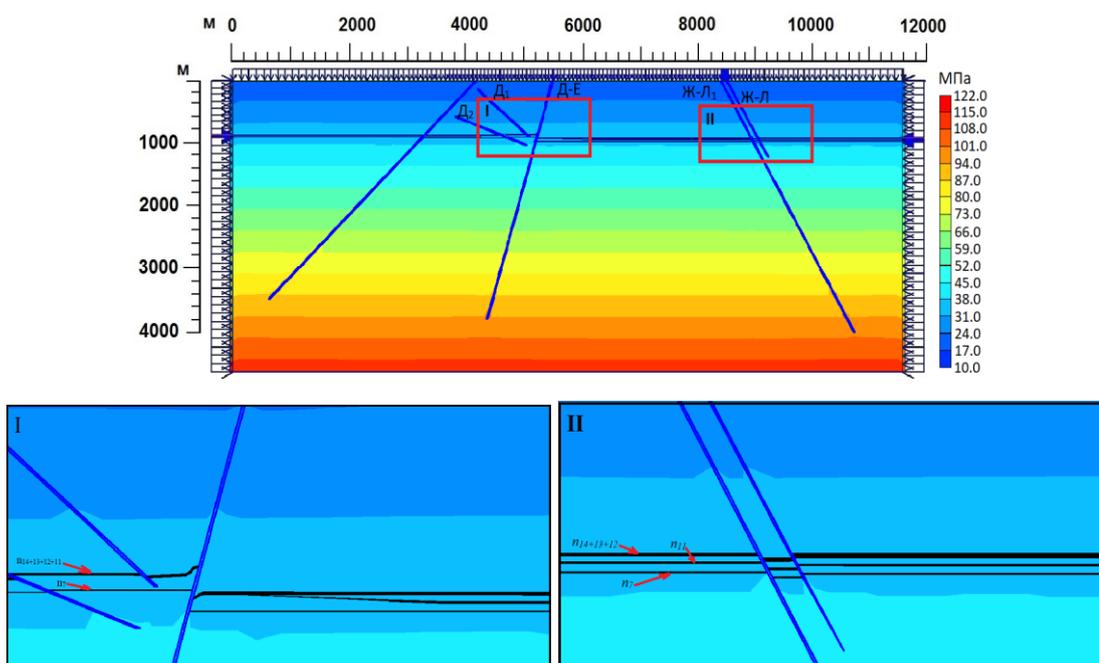


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений с учетом тектонической нарушенности

В компьютерную модель совместно с тектоническими нарушениями вносится геометрия угольного пласта [3], в геоматериал закладываются перечисленные выше физические свойства. При таком подходе в результате расчетов будет получено начальное поле напряжений, энергия которого может проявиться в виде горных ударов [10]. Согласно И.М. Петухову и А.М. Линькову, «в однородной среде избыток энергии, который бы мог превратиться в кинетическую энергию летящих кусков, отсутствует. Однако такой избыток, приводящий к динамическому явлению типа горных ударов, может появляться в неоднородной среде» [11]. Большое количество изменяющихся физических свойств, диапазон которых вносится в модель, создает мультипликатор погрешностей. Для устранения сильного искажения результатов решения выбираем только те параметры, которые в большей степени характеризуют процесс разрушения, в данном случае представленный как рассматриваемое структурной механикой изменение деформаций. Далее была проведена оценка общности решений, позволяющая су-

доть о возможности горного удара. В расчетную модель было заложено 200 различных комбинаций значений  $E_{ur}$  и  $\nu$ , остальные модули деформации  $E_{50}$  и  $E_{oed}$  определены в соответствии с выражением (7), описывающим взаимосвязь модулей деформаций.

Остальные физические свойства, закладываемые в модель, были рассчитаны по формулам из работ [12, 13, 14] и не противоречили данным [1].

#### *Решение задачи и обработка результатов компьютерного моделирования*

Рассмотрим более подробно физические свойства, задаваемые в модели.

Согласно инженерно-геологическим изысканиям коэффициент крепости по М.М. Протодяконову  $f$  для угля равен 2,5, плотность угля составляет  $1350 \text{ кг/м}^3$ .

Предел прочности на сжатие  $[\sigma_{сж}]$  рассчитан из формулы Л.И. Барона [12] и составляет 12,9 МПа:

$$f = 0,33 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma_{сж} + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\sigma_{сж}}. \quad (1)$$

Для сравнения: в литературе, описывающей Воркутское месторождение, встречаются значения пределов прочности на сжатие  $[\sigma_{сж}] = 11 \dots 20 \text{ МПа}$  [1], а на растяжение  $[\sigma_p] \approx 1,4 \text{ МПа}$ .

Угол внутреннего трения и коэффициент сцепления определяем из паспорта прочности. Для параболической формы огибающей кругов Мора выражения выглядят следующим образом [12]:

$$\varphi = 2 \left[ \arctg \left( \frac{1}{2B} \cdot \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} - \frac{\pi}{4} \right) \right]; \quad (2)$$

$$C = B \cdot \sigma_p; \quad B = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} + 1} - 1. \quad (3)$$

Секущий модуль деформации при трехосном нагружении  $E_{50}$  описывает нелинейную упругую область. В основе лежит гиперболическое уравнение, полученное Р.Л. Конднером [15], Дж.С. Зеласко с поправками Дж.М. Дункана и Ц.-Й. Чанга [16]:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{\sigma}{1 - \sigma/\sigma_a}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1$  – продольные деформации,

$\sigma_a$  – асимптотическое девиаторное напряжение.

Асимптотическое девиаторное напряжение соотносят с максимальным девиаторным напряжением  $\sigma_f$  с помощью следующего уравнения:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_f}{R_f}, \quad (5)$$

$$\sigma_f = (C \cdot \text{ctg} \varphi + \sigma_3) \cdot \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (6)$$

Согласно Дж.М. Дункану и Ц.-Й. Чангу [16] величина  $R_f$  изменяется в пределах  $0,75 \dots 1$ .

Модуль деформации при разгрузке  $E_{ur}$  и модуль деформации при нагружении в одометре  $E_{oed}$  находятся в строго определенных диапазонах:

$$2 \cdot E_{50} < E_{ur} < 20 \cdot E_{50}, \quad 0,1 \cdot E_{50} < E_{oed} < 3 \cdot E_{50}. \quad (7)$$

В соответствии с диапазонами корректируется отклонение этих физических свойств от усредненного значения  $E_{ur}$ , определяемого случайным образом, как это указано в постановке задачи.

Значение угла дилатансии определяют графически (см. рис. 2) из зависимости объемных деформаций от продольных. Объемные деформации через продольные и поперечные выражают следующим соотношением [12]:

$$\theta = \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_1$  – относительные продольные деформации,

$\varepsilon_2$  – относительные поперечные деформации.

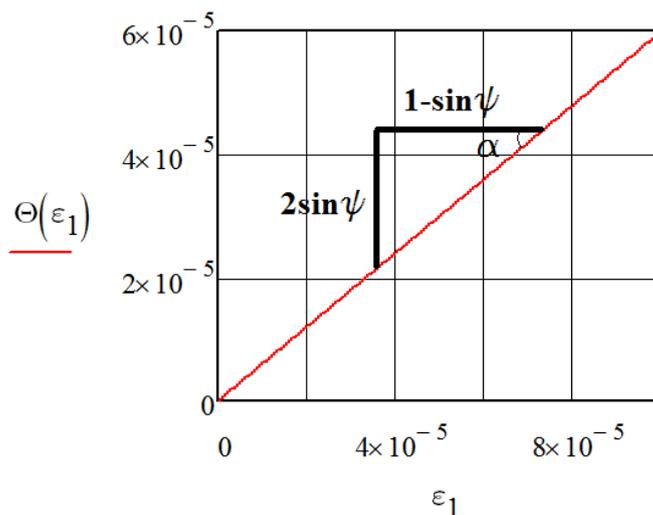


Рис. 5. Определение угла дилатансии для угля

Из рис. 5 следует:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \sin \psi}{1 - \sin \psi}, \quad (9)$$

где  $\psi$  – угол дилатансии:

$$\psi = \arcsin \arcsin \left( \frac{\sin \alpha}{2(\cos \alpha + \sin \alpha)} \right). \quad (10)$$

Физические свойства, закладываемые в модель, сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Физические свойства угля, закладываемые в модель**

Физические свойства	Численные значения
<i>Взятые из технической документации</i>	
Предел прочности на сжатие $[\sigma_{сж}]$ , МПа	12,9
Предел прочности на растяжение $[\sigma_p]$ , МПа	1,4
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1350
Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	37
Коэффициент сцепления $C$ , МПа	3,1
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,16...0,24
Пористость	0,14
<i>Расчетные</i>	
Угол дилатансии $\psi$ , град	10,7
Секущий модуль деформации $E_{50}$ , МПа	508...762
Модуль деформации при трехосной разгрузке $E_{ur}$ , МПа	1016...1524
Модуль деформации при нагружении в одометре $E_{oed}$ , МПа	594...892

В табл.1 модули деформации и коэффициент Пуассона даны в соответствии с указанным в постановке задачи диапазоном.

Было осуществлено решение поставленных задач во всех точках модели (узлы сетки конечных элементов) и пересчитаны в расчетных точках напряжений, далее полученные напряжения были выражены через главные. Из каждой задачи были взяты значения главных напряжений во всех точках, обозначенных на рис. 1, и определен диапазон изменения максимальных и минимальных главных напряжений. Диапазон для максимальных главных напряжений  $\sigma_1$  был разбит с шагом в 5 МПа, а для минимальных главных напряжений  $\sigma_3$  – с шагом в 1 МПа. В каждом интервале диапазона рассчитана плотность числа реализаций. На рис. 3 даны полученные распределения плотностей числа реализаций для точек проявлений горного удара а, b и с и нейтральных точек d, e, f (см. рис. 1). Представленный характер распределения качественно справедлив для других соответствующих точек рис. 1.

#### *Обсуждение результатов*

Горные удары проявляются на различных участках исследуемой области. Из этих же соображений выбраны и нейтральные точки, где инцидентов не наблюдалось. На рис. 6 показаны распределения плотностей числа реализаций максимальных  $\sigma_1$  и минимальных главных напряжений  $\sigma_3$ , определенных в точках горных ударов и в нейтральных точках, где ударов не наблюдалось. Анализируя полученные графики, несложно заметить, что для точек, где происходили горные удары, плотность числа реализаций имеет один пик: для  $\sigma_1$  - 55 – 70 %, для  $\sigma_3$  - 30 – 40 %. Для нейтральных точек значения плотности числа реализаций имеют несколько пиков, что свидетельствует о том, что главные напряжения носят более вариативный характер. На рис. 2 в точках d, e и f присутствует три экстремума с плотностями числа реализаций порядка 40, 20 и 20 % для максимальных главных напряжений, для минимальных все три значения составляют приблизительно 20 %. Это объясняется тем, что в точках d, e и f система состояний с большей гибкостью может «подстроиться» под непредвиденное изменение деформационных свойств, другими словами, происходит постепенное снижение напряженности массива при техногенном воздействии, в то время когда неоднородность в точках a, b и c стремится к большему уравниванию, но при образовании свободной поверхности различие в напряжениях будет существенным. В этом случае происходит резкое изменение напряженного состояния.

Описанные расчеты, позволяющие оценить начальное поле напряжений, являются основой для дальнейших исследований процессов проявления горных ударов. Такие же расчеты со случайным распределением модулей деформации и коэффициента Пуассона следует производить в моделях, включающих поэтапное развитие пластовой отработки. На первом этапе решения определяется начальное поле напряжений массива в отсутствие техногенного воздействия с учетом изложенного в статье метода. В первую очередь это поле формируется за счет тектонических нарушений и действующих горизонтальных тектонических напряжений. И уже в условиях этого напряженно-деформированного состояния осуществляют проходку подготовительных и очистных выработок. В модели выработка представляет собой незаполненное геоматериалом пространство. Компьютерная модель с образованной выработкой является вторым этапом моделирования. Начальным условием для второго этапа будет ряд напряженно-деформированных состояний, полученных на первой стадии, с различными входными параметрами модулей деформации  $E$  и коэффициентов Пуассона  $\nu$ . Для каждого начального состояния поля напряжения осуществляется моделирование выработок в различных направлениях относительно тектонических горизонтальных напряжений. Из всех возможных решений модели выбираются те направления, при которых во взаимодействии с тектоническими нарушениями проявляются наименьшие значения напряженно-деформированного состояния, при этом учитывается и характер распределения плот-

ностей числа реализаций в зависимости от максимальных и минимальных главных напряжений. После этого количество моделируемых выработок можно увеличивать.

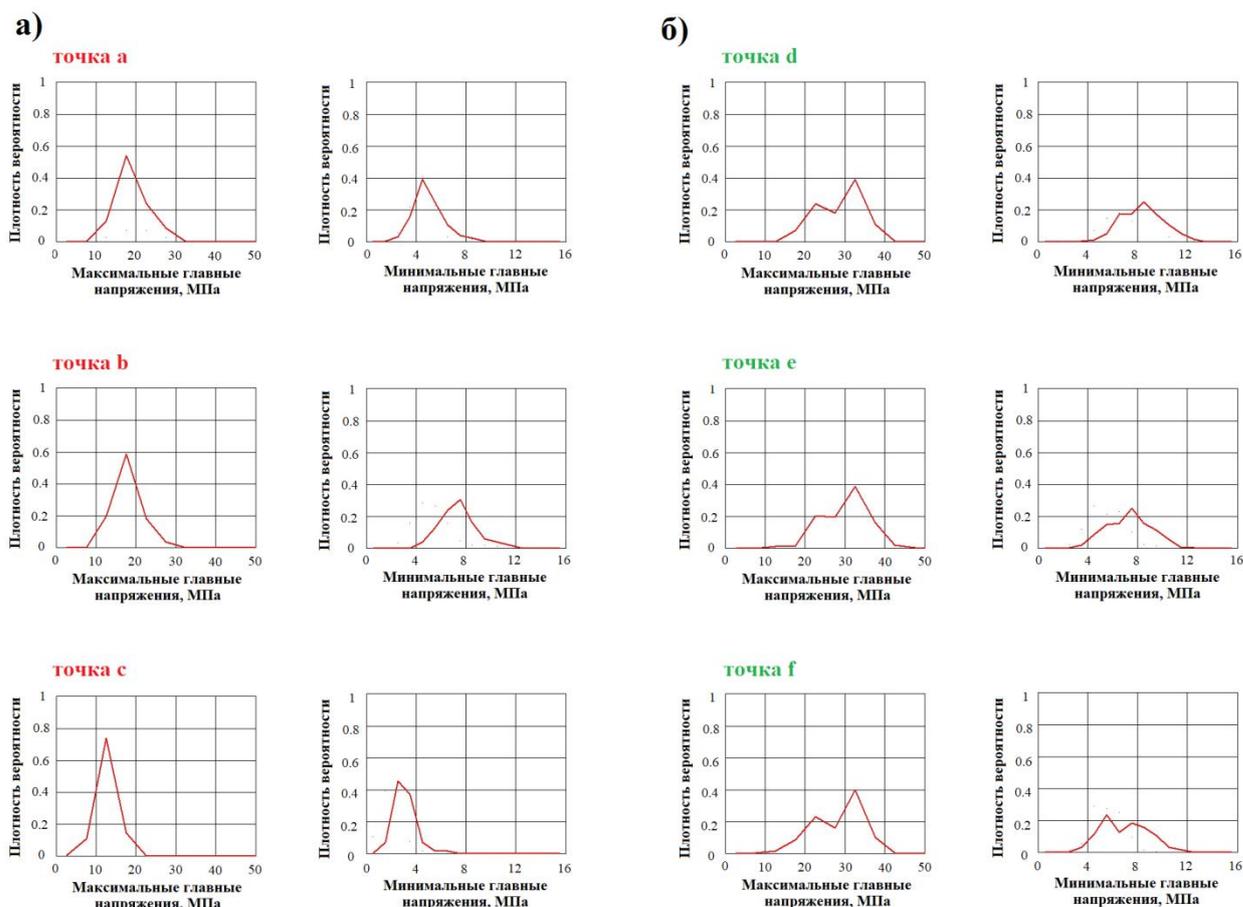


Рис. 6. Распределение плотностей числа реализации главных напряжений: *a* – в точках горных ударов; *b* – в нейтральных точках, где ударов не наблюдалось (на основании решения ряда задач с различными  $E$  и  $\nu$ )

Таким образом, набирается ряд квазистационарных задач с соответствующим напряженно-деформированным состоянием на рассматриваемый момент (этап разработки), условно эти этапы можно представить в виде определенных отдельных интервалов времени, и тогда модели можно свести к уравнениям Фоккера-Планка [18]. Варьируя ориентацию выработок в пространстве, можно создавать прогнозы на основе оценки наименее опасного состояния. Такие подходы становятся возможными с задействованием значительных вычислительных мощностей и в настоящее время являются реализуемыми. Таким образом, моделирование выполняется от причины к следствию.

#### Заключение

В статье рассмотрены основные представления о компьютерном моделировании начального поля напряжений в условиях тектонической нарушенности и то, как физические процессы проявляются в формировании горных ударов. Предложен метод компьютерного моделирования с учетом случайных пар входных параметров «модуль деформации – коэффициент Пуассона». Были произведены расчеты для данных условий с применением теории упрочняющейся среды. Из полученных значений в пересчете в главные напряжения были выбраны значения в точках, где происходили горные удары, и сопоставлены со значениями в нейтральных точках, где горных ударов не было. Такой подход позволил для каждого типа точек выделить общие черты, а соответственно, определить, как сказывается тектоника в процессе формирования горных ударов. Представления о начальном поле напряжений в условиях тектоники позволят в дальнейшем

прогнозировать изменение напряжений с учетом ведения фронта работ. Эти исследования являются темой следующих публикаций.

Полученные результаты не противоречат практике ведения горных работ и могут быть применимы в рамках регионального прогноза, относящегося к выявлению опасных зон расчетными методами.

### Список литературы

1. *Справочник (кадастр) физических свойств горных пород*, 1975. Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. Москва: Недра, 279 с.
2. Chen Yulong, Zuo Jianping, Liu Dejun, Wang Zhenbo, 2018. Deformation failure characteristics of coal-rock combined body under uniaxial compression: experimental and numerical investigations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 1 - 16.
3. Кузьяев Л.С., Пугач А.С., 2014. Метод компьютерного анализа опасных геодинамических процессов на глубоких горизонтах шахт Воркутинского месторождения. *Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: материалы 4-й Российско-Китайской научной конференции, 27 - 31 июля, Владивосток*.
4. Tymiński Wojciech, Kielczewski Tomasz, Daniluk Hubert, 2018. Hardening soil model-influence of index on unloading-reloading modulus. *Proceeding of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, August, pp. 89 - 93.
5. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 декабря 2020 года N 515. Доступ из Электронного фонда правовых и нормативных документов. URL: <https://base.garant.ru/400164978/?> (дата обращения 22.04.2022)
6. Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И., 1971. *Теория упрочняющегося пластического тела*. Москва: Физматлит, 232 с.
7. Fu Xiaolong, Dai Junsheng, Feng Jianwei, 2018. Prediction of tectonic fractures in coal reservoirs using geomechanical method. *Geosciences Journal*, August, Volume 22, Issue 4, pp. 589 - 608.
8. Молчанов А.Е., 2008. Математическое моделирование сеймотектонических процессов в зонах активных разломов. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. *К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов Всероссийской конференции*. В 2-х томах. Т. 1. Москва: ИФЗ, С. 152 - 154.
9. Zoback Mark D., 2007. *Reservoir Geomechanics*. Stanford University, California: Cambridge University Press, 452 p.
10. Song Dazhao, He Xueqiu, Wang Enyuan, Li Zhenlei, Liu Jie, 2019. Coal and Rock Deformation, Failure Mechanism, and Energy Conversion. *Rockburst Evolutionary Process and Energy Dissipation Characteristics*, pp. 19 - 51.
11. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С. и др., 1992. *Расчётные методы в механике горных ударов и выбросов: Справочное пособие*. Москва: Недра, 56 с.
12. Баклашов И.В., 2004. *Геомеханика: Учебник для вузов*. Том 1. Основы геомеханики. Москва: МГГУ, 208 с.
13. Bolton M.D., 1986. The Strength and Dilatancy of Sands. *Geotechnique*, Vol. 36, №1, pp. 65 - 78.
14. Schanz T., Vermeer P.A., 1996. Angles of Friction and Dilatancy of Sand. *Geotechnique*, № 46, pp. 145 - 151.
15. Kondner R.L., 1963. Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils. *Soil Mechanics and Foundation Division Journal*, № 89(1), pp. 115 - 143.

16. Duncan J. M. Chang C.-Y. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Soil Mechanics and Foundation Division Journal*, № 96(5), pp. 1629-1653.
17. Chen Yulong, Zuo Jianping, Liu Dejun, Wang Zhenbo, 2018. Deformation failure characteristics of coal-rock combined body under uniaxial compression: experimental and numerical investigations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 1 - 16. DOI <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1336-0>.
18. Босов А.Д., Орлов Ю.Н., 2013. Эмпирическое уравнение Фоккера-Планка для прогнозирования нестационарных временных рядов. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, № 3, 30 с. URL: [http://www.mathnet.ru/php/\\_archive.phtml?jrnid=ipmp&papered=3&w](http://www.mathnet.ru/php/_archive.phtml?jrnid=ipmp&papered=3&w) (дата обращения 20.04.2022)

### References

1. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornykh porod [Handbook (cadastre) of physical properties of rocks]*, 1975. Pod red. N.V. Mel'nikova, V.V. Rzhvskogo, M.M. Protod'yakonova. Moscow: Nedra, 279 p.
2. Chen Yulong, Zuo Jianping, Liu Dejun, Wang Zhenbo, 2018. Deformation failure characteristics of coal-rock combined body under uniaxial compression: experimental and numerical investigations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 1 - 16.
3. Kuzyaev L.S., Pugach A.S., 2014. Metod komp'yuternogo analiza opasnykh geodinamicheskikh protsessov na glubokikh gorizontakh shakht Vorkutinskogo mestorozhdeniya [The method of computer analysis of dangerous geodynamic processes in the deep horizons of the mines of the Vorkuta deposit]. Nelineinye geometricheskie i geodinamicheskie protsessy pri otrabotke mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh na bol'shikh glubinakh: materyaly 4-i Rossijsko-Kitaiskoi nauchnoi konferentsii, 27 - 31 iyulya, Vladivostok.
4. Tymiński Wojciech, Kielczewski Tomasz, Daniluk Hubert, 2018. Hardening soil model-influence of index on unloading-reloading modulus. *Proceeding of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, August, pp. 89 - 93.
5. Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti "Instruktsiya po prognozu dinamicheskikh yavlenii i monitoringu massiva gornykh porod pri otrabotke ugol'nykh mestorozhdenii" [Federal norms and rules in the field of industrial safety "Instructions for the prediction of dynamic phenomena and monitoring of rock mass during mining of coal deposits"]. Prikaz Federal'noi sluzhby po ekolo-gicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 10 dekabrya 2020 goda N 515. Do-stup iz Elektron'nogo fonda pravovykh i normativnykh dokumentov. URL: <https://base.garant.ru/400164978/?> (data obrashcheniya 22.04.2022)
6. Ivlev D.D., Bykovtsev G.I., 1971. Teoriya uprochnyayushchegosya plasticheskogo tela [Theory of a hardening plastic body]. Moscow: Fizmatlit, 232 p.
7. Fu Xiaolong, Dai Junsheng, Feng Jianwei, 2018. Prediction of tectonic fractures in coal reservoirs using geomechanical method. *Geosciences Journal*, August, Volume 22, Issue 4, pp. 589 - 608.
8. Molchanov A.E., 2008. Matematicheskoe modelirovanie seismotektonicheskikh protsessov v zonakh aktivnykh razlomov [Mathematical modeling of seismotectonic processes in active fault zones. Tectonophysics and current issues of Earth sciences]. Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle. K 40-letiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN: Tezisy dokladov Vserossiiskoi konferentsii. V 2-kh tomakh. Vol. 1. Moscow: IFZ, P. 152 - 154.
9. Zoback Mark D., 2007. *Reservoir Geomechanics*. Stanford University, California: Cambridge University Press, 452 p.
10. Song Dazhao, He Xueqiu, Wang Enyuan, Li Zhenlei, Liu Jie, 2019. Coal and Rock Deformation, Failure Mechanism, and Energy Conversion. *Rockburst Evolutionary Process and Energy Dissipation Characteristics*, pp. 19 - 51.
11. Petukhov I.M., Lin'kov A.M., Sidorov V.S. i dr., 1992. Raschetnye metody v

mekhanike gornykh udarov i vybrosov: Spravochnoe posobie [Computational methods in the mechanics of rock impacts and emissions: A reference guide]. Moscow: Nedra, 56 p.

12. Baklashov I.V., 2004. Geomekhanika: Uchebnik dlya vuzov [Geomechanics: Textbook for universities]. Vol. 1. Osnovy geomekhaniki. Moscow: MGGU, 208 p.

13. Bolton M.D., 1986. The Strength and Dilatancy of Sands. *Geotechnique*, Vol. 36, №1, pp. 65 - 78.

14. Schanz T., Vermeer P.A., 1996. Angles of Friction and Dilatancy of Sand. *Geotechnique*, № 46, pp. 145 - 151.

15. Kondner R.L., 1963. Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils. *Soil Mechanics and Foundation Division Journal*, № 89(1), pp. 115 - 143.

16. Duncan J. M. Chang C.-Y. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Soil Mechanics and Foundation Division Journal*, № 96(5), pp. 1629-1653.

17. Chen Yulong, Zuo Jianping, Liu Dejun, Wang Zhenbo, 2018. Deformation failure characteristics of coal-rock combined body under uniaxial compression: experimental and numerical investigations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 1 - 16. DOI <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1336-0>.

18. Bosov A.D., Orlov Iu.N., 2013. Empiricheskoe uravnenie Fokkera-Planka dlya prognozirovaniya nestatsionarnykh vremennykh ryadov [Empirical Fokker-Planck equation for forecasting nonstationary time series]. Preprinty IPM im. M.V. Keldysha, № 3, 30 s. URL: [http://www.mathnet.ru/php/\\_archive.phtml?jrnid=ipmp&papered=3&w\\_data obrashcheniya 20.04.2022](http://www.mathnet.ru/php/_archive.phtml?jrnid=ipmp&papered=3&w_data obrashcheniya 20.04.2022)).