© Н.И. Сысоев, Чу Ким Хунг, 2016

УДК
622.233.6
(075.8)

Н.И. Сысоев, Чу Ким Хунг

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ ШПУРА ГОРНЫХ ПОРОД С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Предложено численное моделирование процесса бурения шпура горных пород с применением упруго-пластической модели на основе метода конечных элементов. При этом обеспечивается имитация разрушения породы с учетом ее механических свойств и динамических параметров процесса разрушения (сколообразования), что позволяет определять усилие подачи и крутящий момент при бурении идеально острым резцом, к значениям величин которых добавляются приращения, обусловленные затуплением резца, определяемые с помощью известных простых эмпирических зависимостей. Приведены примеры расчета для трех типов резцов, свидетельствующие об адекватности предлагаемого метода и возможности применения его для решения инженерных задач.
Ключевые слова: бурение шпуров, буровой резец, численное моделирование, метод конечных элементов, упругопластическая модель, усилие подачи, крутящий момент.

Введение

Вращательное бурение шпуров, несмотря на кажущуюся простоту, является сложным взаимосвязанным процессом, на эффективность которого влияет целый ряд факторов. В настоящее время исследования процесса бурения шпуров выполнены только экспериментально-статическим методом и накопленные экспериментальные данные можно использовать в рамках выполненных частных исследований.

В результате обобщения многочисленных исследований получены эмпирические зависимости по расчету средних значений усилия подачи $P_у$ и крутящего момента $M_{кр}$ при бурении шпуров [1, 2]:

$$P_y = 1{,}2 \cdot P_к \cdot \left[k_д \cdot F_{зат} - \frac{k_{ск} \cdot S \cdot (r - r_p) \cdot (\cos\gamma - \mu_1 \cdot \sin\gamma) \cdot \sin\varphi_{ср}}{2 \cdot \sin(\tau + \gamma) \cdot \sin\tau} \right] \quad (1)$$

$$M_{кр} = 0,87 \cdot 10^{-3} \cdot r \cdot P_к \cdot$$

$$\cdot \left[k_д \cdot \mu_c \cdot F_{зат} + \frac{k_{ск} \cdot S \cdot (r - r_p) \cdot (\sin\gamma + \mu_1 \cdot \cos\gamma)}{2 \cdot \sin(\tau + \gamma) \cdot \sin\tau} \right]. \qquad (2)$$

где: s – удельная подача резца, мм/об; $к_д$ – коэффициент пропорциональности между контактной прочностью и усилием затрачиваемым на дробление $к_д = 0,24$ [2]; $к_{ск}$ – коэффициент пропорциональности между контактной прочностью и усилием затрачиваемым на скалывание, $к_{ск} = 0,06$ [2]; r, rp – радиус резца и радиус угол раствора, мм; γ – угол резания, град; μ_1 – коэффициент трения; μ_c – коэффициент сопротивления сверлению; $\varphi_{ср}$ – среднее значение концевого угла; τ – угол скалывания породы, град; $F_{зат}$ – проекция площадки затупления, мм^2.

Недостатком этих формул является то, что они ограниченно учитывают влияния физических свойств горных пород, а также многообразие форм режущей части и геометрии бурового резца на процесс бурения шпуров. В результате они не могут быть использованы для выбора оптимальных конструкций из большого разнообразия имеющихся и вновь создаваемых резцов для бурения шпуров, а также выбора оптимальных режимов бурения для заданных условий.

В связи с этим требуется разработать математическую модель процесса бурения, которая должна учитывать конструктивные особенности бурового резца, свойства горной породы и режимные параметры бурения. Возможности современных средств вычислительной техники и программного обеспечения позволяют решать данную задачу, используя численное моделирование процесса бурения шпуров на основе метода конечных элементов.

Постановка задач

Разработка численного метода моделирования процесса взаимодействиям бурового инструмента режущего типа с разрушаемой средой, что позволит решить задачу определения нагруженности буровых резцов любых конструктивных исполнений и выбора оптимальных параметров их режущей части.

Основы метода конечных элементов применительно к математической модели описания процесса бурения

В данной работе процесс бурения горных пород рассматривается как динамическая контактная задача механики. Про-

цесс бурения представлен совокупностью процессов упругопластического деформирования и разрушения массива горных пород в локальной области под воздействием абсолютно жесткой режущей пластины.

Моделирование процесса бурения методом конечных элементов осуществляется путем решения системы уравнений механики сплошной среды. В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие отношения теории упругости, пластичности и разрушения. Система уравнений решается при заданных и граничных условиях [3, 4].

Для динамических задач уравнение равновесия системы конечных элементов представляется в матричной форме:

$$Ma + F^{\text{int}} = F^{ext},$$

где: M – матрица масс, a – вектор ускорения; F^{Int}, F^{ext} – векторы внутренних и внешних сил;

Для решения динамической системы уравнения методом конечных элементов применен явный подход (explicit). Идея явного подхода состоит в том, что зная значение решения x_{n} в n-й момент можно найти решения $x_{\text{n+1}}$ в (n+1)-й момент времени. В программе ANSYS/LS-dyna применен метод центральных разностей для выполнения этого подхода. Таким образом, использование метода центральных разностей позволяет определить значения ускорения a, скорости v и перемещения u в (n+1)-й момент времени:

$$a_n = M^{-1}(F_n^{ext} - F_n^{\text{int}});$$

$$v_{n+\frac{1}{2}} = v_{n-\frac{1}{2}} + a_n \Delta t_n;$$

$$u_{n+1} = u_n + v_{n+\frac{1}{2}} \Delta t_{n+\frac{1}{2}};$$

где: Δt – временный шаг,

$$\Delta t_{n+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta t_n + \Delta t_{n+1}}{2},$$

индексы относят искомые величины к соответствующим временным слоям.

Геометрия обновляется добавлением приращения перемещения к исходной геометрии x_0:

$$x_{n+1} = x_0 + u_{n+1}.$$

Подставляя в уравнения баланса перемещение $u_{\text{n+1}}$ в (n+1)-й момент времени, получим деформации и напряжения в (n+1)-й момент времени.

Уравнение связи между перемещениями и деформациями (геометрическое уравнение) представляется формулой

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji}),$$

а между напряжениями и деформациями (физическое уравнение) формулой

$$\sigma_{ij} = \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk} + 2\mu\varepsilon_{ij}.$$

Метод центральных разностей является явным подходом, но его состояние стабильное, это означает, что при использовании этого способа решения проблем, размер временного шага должен быть меньше, чем пороговое значение, определяемое конкретной задачей.

$$\Delta t \le \Delta t^{crit} = \frac{2}{\omega_{\max}},$$

где $\omega_{\max}$ – максимальная собственная круговая частота рассматриваемой системы. Достаточно точное определение значения $\omega_{\max}$ может быть получено по формуле

$$\omega_{\max} \approx \frac{2c}{\Delta x_{\min}},$$

где c – скорость звука в материале; $\Delta x_{\min}$ – минимальный характерный размер входящих в рассматриваемую систему элементов.

Для описания свойств горных пород была выбрана упругопластическая модель Друкера-Прагера [4, 5] с механическими характеристиками: модуль сдвига G, коэффициент Пуассона ν, объемная масса ρ, удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ. Критерий прочности Друкера-Прагера является обобщением закона Кулона-Мора, при котором форма предельной поверхности задается уравнением

$$J_2 - aI_1 - b = 0,$$

где: I_1 – первый инвариант тензора напряжений, определяемый по формуле

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3;$$

J_2 – второй инвариант девиаторной части тензора напряжений,

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2],$$

$$a = \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{\sin\varphi}{(3 - \sin\varphi)} \text{ и } b = \frac{6}{\sqrt{3}}\frac{C\cos\varphi}{(3 - \sin\varphi)},$$

C – удельное сцепление, φ–угол внутреннего трения.

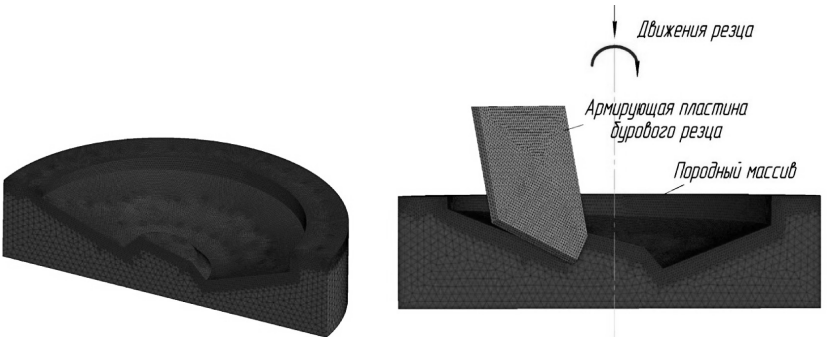

Рис. 1. Конечно-элементная модель бурения одной армирующей пластиной

Численное моделирование процесса бурения шпура. Основываясь на вышеприведенных положениях, в данной работе были выполнены расчеты бурового резца БИ-741, для которого имеются сведения о результатах экспериментальных исследований и получены соответствующие эмпирические зависимости [1, 2].

Для выполнения расчетов нагружености резца было осуществлено построение модели бурения одной пластиной на половине оборота резца, в которую входят все характерные параметры геометрии инструмента и забоя горной породы. Конечно-элементная модель бурения показана на рис. 1. При бурении инструмент совершает вращение вокруг оси и перемещение вдоль оси. Исходные параметры свойств режущего инструмента и породного массива приведены в табл. 1.

В данной работе в качестве критерия стружкообразования был принят критерий предельной сдвиговой деформации, ε_{max}. Согласно этому критерию разрушение материала при сложном напряженном состоянии произойдет в том случае, когда

Таблица 1

Принятые исходные параметры свойств режущего инструмента и породы

Материал	**Объемная масса, ρ, Кг/м³**	**Модуль сдвига, *G*, ГПа**	**Коэффициент Пуассона, ν**	**Удельное сцепление, *C*, МПа**	**Угол внутреннего трения, φ, град**	**Контактная прочность**
Песчаник	2700	32	0,21	45	35	1880
Твердый сплав ВК8	14 500	600	0,2	–	–	–

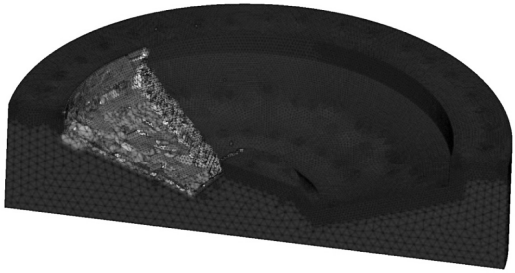

Рис. 2. Имитация процесса разрушения породного массива при бурении

сдвиговая деформация в точке превысит допустимое значение. В этом случае конечные элементы считаются разрушенными и автоматически удаляются из расчетов. Имитация процесса разрушения породного массива при бурении показана на рис. 2, а зависимости усилия подачи и крутящего момента во времени показаны на рис. 3, 4.

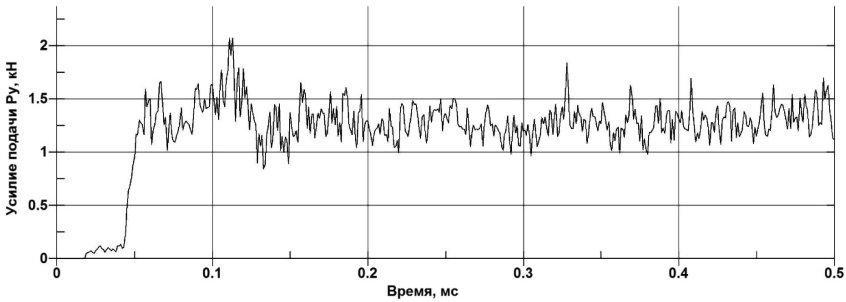

Рис. 3. Зависимость усилия подачи при бурении шпура резцом БИ-741 численным методом во времени (на одной пластине)

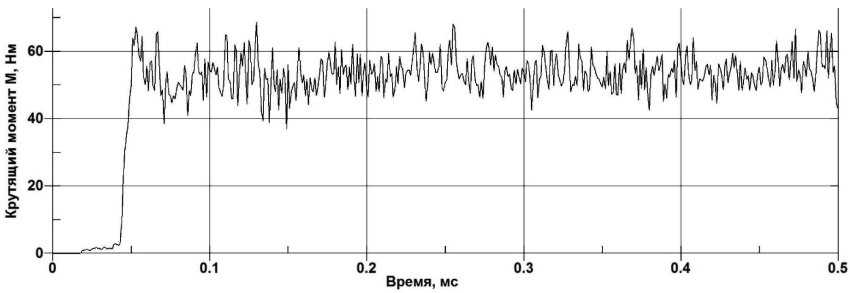

Рис. 4. Зависимость крутящего момента при бурении шпура резцом БИ-741 численным методом (на одной пластине)

После обработки «осциллограмм» получены средние усилия подачи и крутящего момента при бурении идеально острым резцом $P_{у,остр}$, $M_{остр}$.

Согласно формуле (1) и (2) и экспериментальным исследованиям, усилие подачи и крутящий момент состоят из двух слагаемых – усилий $P_{уз}$ и $P_{уп}$, моментов $M_з$ и $M_п$ соответственно на торцовой и передней площадках:

$$P_y = P_{уз} + P_{уп} = P_{y,остр} + i_P F_{зат}$$

$$M = M_з + M_п = M_{остр} + i_M F_{зат}$$

где $P_{у,остр}$, $M_{остр}$ – средние значения усилия подачи и крутящего момента соответственно при бурении идеально острым резцом; $F_{зат}$ – проекция площадки затупления резца на плоскость резания; i_P, i_M – интенсивности роста усилия подачи и крутящего момента в зависимости от степени затупления резца, из формул (1), (2) получено

$$i_p = 1,2 \times 0,24 \times P_k = 0,288 \times P_k$$

и

$$i_M = 0,87 \times 0,24 \times \mu_c \times r \times P_k = 0,208 \times \mu_c \times r \times P,$$

где P_k – контактная прочность породы; μ_c – коэффициент сопротивления сверлению; r – радиус бурового резца.

Таким образом, сущность метода определения средних значений усилия подачи и крутящего момента при бурении шпуров численным моделированием заключается в том, что сначала применением метода конечных элементов определяются значения усилия подачи и крутящего момента при бурении идеально острым резцом. Затем к ним добавляются приращения усилия подачи и крутящего момента, обусловленные износом резца. Эти приращения определяются с помощью известных простых эмпирических зависимостей.

Для доказывания адекватности этого метода было проведено сравнение результатов экспериментальных исследований, численного моделирования и вычислений по эмпирическим формулам. Результаты экспериментальных исследований были приняты из работы, выполненной С.Г. Мирным [1].

Для вычислений средних значений силовых параметров по эмпирическим формулам (1), (2) были приняты исходные параметры [2]: $\gamma = 105°$; $r = 21$; $r_р = 4$; $\varphi_{ср} = 136°$; $\mu_1 = 0,4$; $\mu_1 = 0,35$; $\tau = 25°$. Для острого резца проекция площадки затупления условно принята $F_{зат} = 7$ мм^2. Результаты средних силовых парамет-

Таблица 2

Средние значения усилия подачи и крутящего момента, полученные разными способами

Толщина стружки, мм	Экспериментально		Численным моделированием		По эмпирическим формулам	
	усилие подачи, Н	крутящий момент, Нм	усилие подачи, Н	крутящий момент, Нм	усилие подачи, Н	крутящий момент, Нм
0,5	4598	40,7	4826	60,5	5264	66,8
1	6005	60,8	5450	80,2	6738	113,5
1,5	6994	69,7	5830	102,8	8212	160,2
2	8606	101,3	6398	128,4	9686	206,8

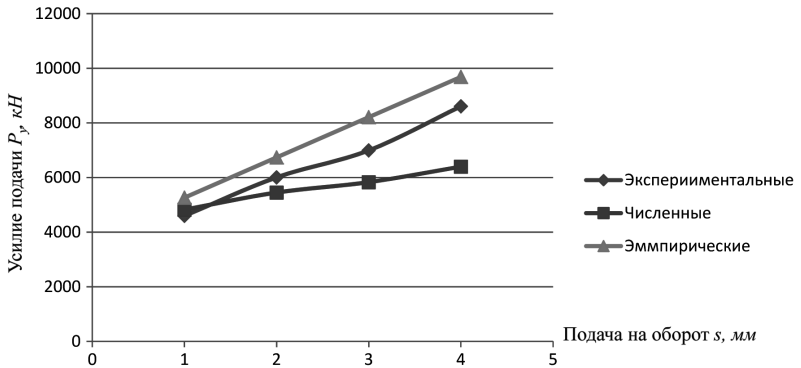

Рис. 5. Зависимости усилия подачи P_y от подачи на оборот s полученные разными способами

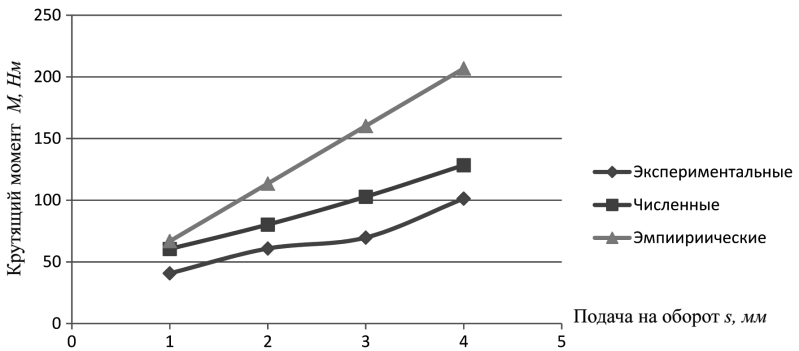

Рис. 6. Зависимости крутящего момента M от подачи на оборот s полученные разными способами

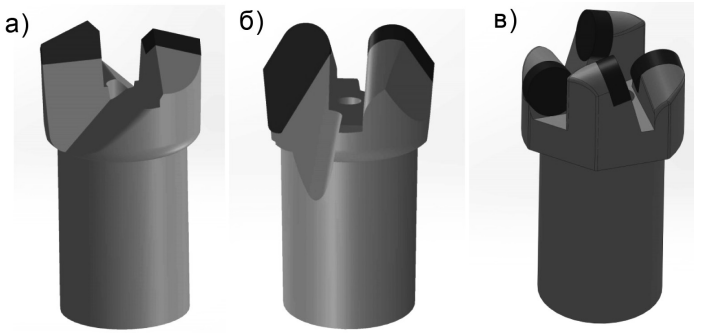

Рис. 7. Твердотельные модели буровых резцов: а) БИ-741, б) РП-42, в) РШ-140

ров при бурении острым резцом БИ-741 приведены в табл. 2.По этим данным построены графики (рис. 5, 6).

Таким образом, результаты определения силовых параметров бурения (усилия подачи и крутящего момента) численным моделированием согласуются с полученными ранее экспериментальными данными, что дает основание применять этот метод для решения инженерных задач, связанных с анализом геометрических параметров выбираемых для данных условий или проектируемых резцов. Для подтверждения этого были выполнены расчеты нагруженности резцов с различными геометрическими формами и параметрами (БИ-741, РП-42, РШ-140), представленными на рис. 7. Резцы БИ-741 имеют линейно-ломанную форму и большой концевой угол, равный 136°. Эти резцы армируются твердосплавными пластинами. Резцы РП-42 в средней части имеют скругленную форму и малый концевой угол и также армируются твердосплавными пластинами. Резцы РШ-140 существенно отличаются от указанных выше резцов по форме и параметрам. Они армируются четырьмя круглыми ал-

Таблица 3

Результаты определения численным моделированием силовых параметров бурения острыми резцами при подаче s = 4 мм

Тип резца	**Силовые параметры**	
	усилие подачи, Н	**крутящий момент, Нм**
БИ-741	6398	128,4
РП-42	7225	141,0
РШ-140	5940	118,8

мазно-твердосплавными пластинами (АТП), попарно ступенчато расположенными по высоте. Результаты расчетов силовых параметров при бурении различными резцами в одинаковых условиях приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что у резцов БИ-741 и РП-42 значения усилий подачи и крутящего момента отличаются в пользу резца БИ-741, что объясняется особенностью его геометрии. У резца РШ-140 усилие подачи и крутящий момент наименьшие. Это объясняется тем, что при бурении шпуров резцы, имеющие ступенчатую схему разрушения породы более эффективны, чем резцы, имеющие сплошную схему разрушения, так как при бурении ступенчатым резцом опережающими пластинами формируются дополнительные свободные стенки забоя, которые облегчают работу отстающих режущих пластин. Следовательно, рассматриваемый метод является чувствительным к формам режущей части буровых резцов и их параметрам.

Вывод

Применение упруго-пластической модели для численного моделирования процесса бурения шпура резцом обеспечивает имитацию разрушения породы с учетом ее механических свойств и динамических параметров процесса разрушения (сколообразования), а также определения конкретных силовых параметров в зависимости от формы и конструктивных параметров резца. Численное моделирование на основе метода конечных элементов может быть использовано для выбора оптимальных конструктивных параметров бурового резца, не прибегая к длительным и дорогостоящим экспериментальным исследованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мирный С. Г.* Обоснование и выбор рациональной частоты вращения штанги машин для сверления шпуров в породах повышенной крепости и абразивности. Дис. к.т.н. – Новочеркасск: НПИ, 2005. –142 с.

2. *Крапивин М. Г.*, *Раков И. Я.*, *Сысоев Н. И.* Горные инструменты. 3-е изд., перераб. и доп. –М.: Недра, 1990. –256 с.

3. *Фадеев А. Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

4. *LSTC, LS-DYNA* Keyword User's Manual, Version 971,Livermore Software Technology Corporation, Livermore, Calif, USA, 2007.

5. *Drucker D. C.*, *Prager W.* Soil mechanics and plastic analysis for limit design // Quarterly of Applied Mathematics, 1952, vol. 10, no. 2, pp. 157–165. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Сысоев Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, e-mail: SysoevNI@npi-tu.ru,
Чу Ким Хунг – аспирант, e-mail: hungocrus@gmail.com,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова.

UDC
622.233.6
(075.8)

N.I. Sysoev, Chu Kim Hung

NUMERICAL SIMULATION OF THE BLAST-HOLE DRILLING ROCKS WITH ELASTIC-PLASTIC MODEL

The paper presents a numerical simulation of the blast-hole drilling rocks with elastic-plastic model based on the finite element method. This provides an imitation rock failure in view of its mechanical properties and the dynamic parameters of the chipping process, which allows to determine the thrust and torque of drilling by perfectly sharp bit, to the values of variables that add incremental caused by blunt bit defined by a known simple empirical dependences. Examples of the calculation for the three types of cutters, indicating the adequacy of the proposed method and the possibility of its application to solve engineering problems were presented.

Key words: blast-hole drilling, drilling cutter, numerical simulation, finite-element method, elastic-plastic model, thrust, torque.

AUTHORS

Sysoev N.I.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: SysoevNI@npi-tu.ru,
Chu Kim Hung[1], Graduate Student, e-mail: hungocrus@gmail.com,
[1] M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
346428, Novocherkassk, Russia.

REFERENCES

1. Mirnyy S. G. *Obosnovanie i vybor ratsional'noy chastoty vrashcheniya shtangi mashin dlya sverleniya shpurov v porodakh povyshennoy kreposti i abrazivnosti* (Justification and choice of rotational frequency rod machines for blast-holes drilling in the rocks with increased hardness and abrasibility), Candidate's thesis, Novocherkassk, NPI, 2005, 142 p.

2. Krapivin M. G., Rakov I. Ya., Sysoev N. I. *Gornye instrumenty*. 3-e izd. (Mining tools, 3rd edition), Moscow, Nedra, 1990, 256 p.

3. Fadeev A. B. *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* (Finite-element method in geomechanics), Moscow, Nedra, 1987, 221 p.

4. *LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 971*, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, Calif, USA, 2007.

5. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, vol. 10, no. 2, pp. 157–165.