

УДК 622.232.001.12.542

Н.В. Мутовина, Ю.И. Климов, А.Ю. Смолин

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЩЕЛЕВОГО ГИДРООТРЫВНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С ПОРОДНЫМ ЦЕЛИКОМ¹

Представлены результаты моделирования гидроотрывника с подрезанным целиком породы. Получены картины распределения максимальных касательных напряжений в массиве. Определены поля напряжений и деформаций целика и прилегающего к нему массива, установлены зоны растяжения и сжатия целика, найдены максимальные значения эквивалентных напряжений в зоне растяжения.

Ключевые слова: моделирование, щелевой гидроотрывной рабочий орган горного комбайна, комбинированные способы разрушения целика, напряженно-деформированное состояние.

Необходимость снижения удельных энергозатрат на разрушение, улучшения сортности добываемых полезных ископаемых и уменьшения запыленности призабойного пространства привели исследователей и конструкторов к разработке комбинированных способов разрушения, где наряду с традиционным резанием используется малоэнергоемкое разрушение горных пород, в частности разрушение отрывом.

Исследования работы насосного привода гидроотрывника показали, что он является простым и надежным в эксплуатации, однако имеет один существенный недостаток, а именно, для него характерна потеря продольной устойчивости комбайна при отрыве больших целиков породы [1]. Это происходит вследствие того, что усилия отрыва, необходимые для отделения целика от массива, оказываются больше силы трения ходовой части комбайна о почву выработки. В результате подтягивания комбайна на забой в процессе отрыва породного целика происходит прижатие режущего диска к забою и, как следствие, резкое увеличение потребляемой мощности вплоть до «опрокидывания» электродвигателя [2].

В качестве альтернативы предложен насосно-аккумуляторный (импульсный) привод гидроотрывника, который впервые был реализован в комбайне «Алмаз-1И», созданном на базе проходческого комбайна ПК-9р [3]. Основным элементом такого привода является пульсатор давления, или генератор импульсов, который представляет собой цилиндр, разделенный поршнем на жидкостную и газовую камеры и снабженный импульсным клапаном.

После формирования надщелевого породного целика рабочая жидкость, находящаяся в жидкостной камере пульсатора под давлением сжатого газа, открывает импульсный клапан и устремляется в рабочую полость гидроотрывника. Происходит рабочий ход последнего. Поскольку объем жидкостной камеры пульсатора давления в 1,5 раза превышает объем рабочей полости гидроцилиндра отрывника, практически пульсатор давления является источником давления с бесконечно большим расходом [4]. Это обстоятельство предопределяет более высокие скоро-

¹ Работа проведена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-90905 мол_ин_нр.

сти движения гидроотрывного рабочего органа с импульсным приводом нежели с насосным. Таким образом, импульсный привод гидроотрывника позволяет формировать рабочее давление в гидроцилиндре до начала движения отрывника и поддерживать его на протяжении всего рабочего хода.

Для обеспечения эффективной работы импульсного привода отрывника необходимо проведение дальнейших исследований по выбору и обоснованию его параметров, а также по взаимодействию рабочего элемента отрывника с породным целиком при различных скоростях приложения нагрузки. При этом наиболее сложной и трудоемкой задачей является определение напряженно-деформированного состояния породного целика серповидной формы и усилия, необходимого на отделение последнего от массива [5].

Предметом настоящего исследования является процесс взаимодействия щелевого гидроотрывного рабочего органа горного комбайна с породным целиком при его отделении от массива. Исследование проводилось с помощью численного моделирования. При этом рабочий ход гидроотрывника в соответствии с условиями работы реального рабочего органа разделен на три характерных этапа: первый – этап приближения тарелки отрывника к целику; второй – этап деформации и отрыва целика от массива; третий – этап транспортирования оторванного целика из зоны щели, торможения и остановки шток-поршня гидроотрывника. Для численного решения этих задач используются программы GRAPH-PA [6] и ANSYS [7]. Отметим, что система GRAPH-PA представляет собой средство автоматизации проектирования динамических объектов различной физической природы (механической, гидравлической и др.) и предназначена для анализа динамических процессов в объектах, математические модели которых описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений. Система ANSYS предназначена для численного решения различных задач механики методом конечных элементов и в данной работе использована для определения напряженно-деформированного состояния целика и прилегающего к нему горного массива.

На рис. 1 приведена гидрокинематическая схема щелевого гидроотрывного рабочего органа горного комбайна. В исходном положении тарелка 2 рабочего органа, встроенная в режущий диск 1, находится в щели на некотором расстоянии от породного целика 3. При подаче рабочей жидкости в напорную полость А гидроцилиндра тарелка отрывника со шток-поршнем перемещается вправо по рисунку, входит в контакт с целиком и деформирует его.

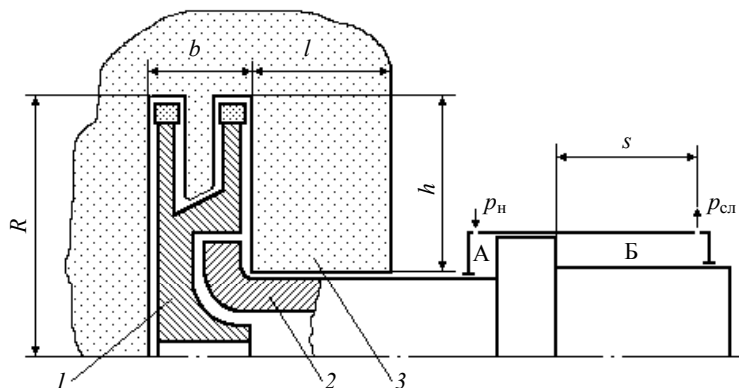


Рис. 1. Гидрокинематическая схема щелевого гидроотрывного рабочего органа

После отделения целика от массива шток-поршень с тарелкой, продолжая движение вплоть до остановки, выносит оторванный целик из зоны разрушения. Дополнительные обозначения на рисунке следующие: R – радиус диска; b – ширина щели; l и h – толщина и высота породного целика; p_n и $p_{сл}$ – напорное и сливное давления рабочей жидкости соответственно.

Полная картина напряженно-деформированного состояния целика и прилегающего к нему массива получена при математическом моделировании взаимодействия тарелки отрывника с породным целиком с использованием программы ANSYS, основанной на методе конечных элементов. Данная программа позволила построить точные геометрические модели целиков сложной серповидной формы без их предварительного упрощения.

Конечноэлементные модели породного массива с целиком серповидной формы представлены на рис. 2, *а* и *б*. Модель представляет собой вырезанную из массива область, причем размеры этой области достаточно велики, что позволяет исключить влияние граничных условий на напряженно-деформированное состояние целика и прилегающей к нему части массива.

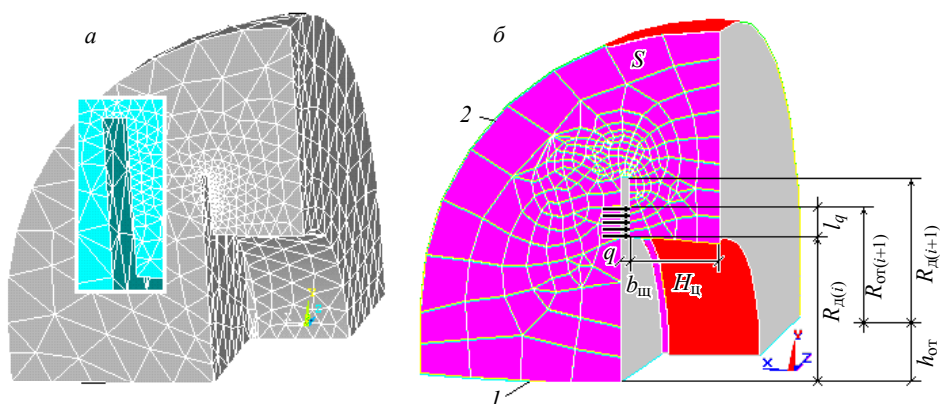


Рис. 2. Расчетная схема породного массива при щелевом отрыве: *а* – модель с объемными конечными элементами типа 3D; *б* – модель с осесимметричными плоскими конечными элементами типа 2D

В силу симметрии геометрической формы целика и приложенных к нему нагрузок рассматривается четверть вырезанной области. Моделирование выполнялось как с использованием объемных конечных элементов типа 3D в форме тетраэдров согласно рис. 2, *а*, так и осесимметричных плоских элементов типа 2D в форме четырехугольников согласно рис. 2, *б*.

В последнем случае элементы располагаются в плоскости меридианного сечения выделенной области. Сетка разбиения областей на конечные элементы неравномерная – у концентратора напряжений, каковым является угол прорезаемой диском щели, она сгущается, а к периферии области разрежается.

Из расчетной схемы согласно рис. 2, *б* видно, что режущий диск диаметром R_d образует параллельно свободной поверхности забоя щель шириной $b_{щ}$. Высота породного целика, или шаг отрыва $h_{от}$, определяется расстоянием между положениями режущего диска на предыдущем (i) и последующем ($i+1$) шагах, а толщина целика равна $H_{ц}$.

С внутренней поверхности на целик, имеющий серповидную форму, воздействует тарельчатый отрывник радиусом $R_{от}$, создавая равномерно распределенную нагрузку интенсивностью q на длине l_q . Сечение S делит выделенный объем массива вместе с породным целиком на две равные части относительно оси Y , т.е. находится в плоскости симметрии.

Входные параметры, принятые для расчета в модели, показанной на рис. 2, б, были следующими: $R_d = 0,5$ м; $R_{от} = 0,4$ м; $b_{щ} = 0,03$ м; $H_{щ} = 0,3$ м; $h_{от} = 0,2$ м; $q = 10^7$ Н/м; $l_q = 0,1$ м. Разрушаемый массив представлен песчаником с временным сопротивлением растяжению $\sigma_p = 6 \cdot 10^6$ Па; модулем упругости $E = 6 \cdot 10^7$ Па и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$. Условием разрушения является соотношение между максимальным растягивающим эквивалентным напряжением $\sigma_{экв}$ и временным сопротивлением растяжению σ_p , т.е. $\sigma_{экв} \geq \sigma_p$.

В результате решения задачи получены картины распределения трех главных нормальных σ_I , σ_{II} , σ_{III} (рис. 3, а, б, в), касательного σ_{xy} (рис. 3, г) и эквивалентного $\sigma_{экв}$ (рис. 3, д) напряжений в рассматриваемом сечении, а также узловых перемещений элементов целика δ_x вдоль оси X под действием приложенной нагрузки (рис. 3, е). Как видно из рис. 3, все три главных напряжения у угла щели, примыкающего к целику, являются напряжениями растяжения и имеют максимальную величину.

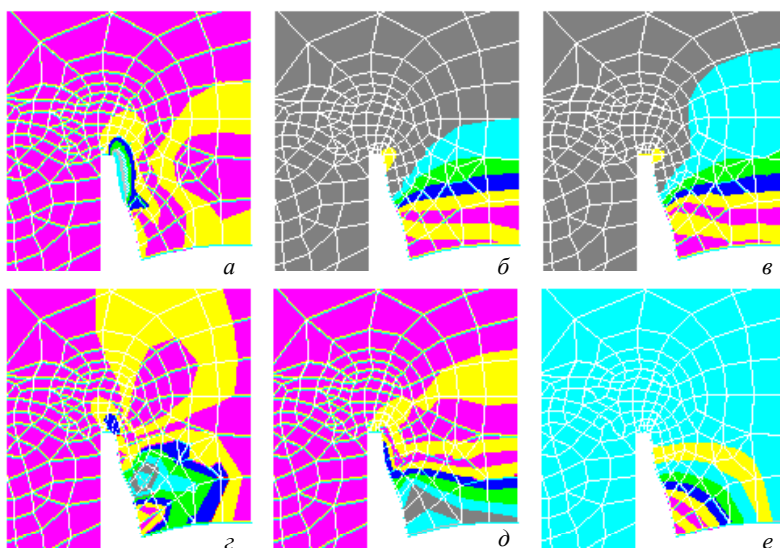


Рис. 3. Распределение напряжений и перемещений в породном массиве при отрыве целика (пояснение в тексте)

По мере удаления от угла щели, являющегося концентратором напряжений, растягивающие напряжения уменьшаются по величине и переходят в сжимающие, причем картина распределения первого главного напряжения значительно отличается от двух других.

Из распределения эквивалентных напряжений в рассматриваемом сечении (рис. 3, д) видно, что наибольшие по величине напряжения $\sigma_{экв}$ возникают в зоне сжатия у вершины породного целика, однако образование трещины и разрушение

последнего вызывают напряжения в зоне растяжения в окрестности концентратора напряжений.

В процессе отрыва целик деформируется, причем наибольшее смещение вдоль оси X получают точки у вершины целика (рис. 3, e).

На рис. 4 представлены зависимости напряжений и деформаций в теле целика вдоль линии L_1 , проходящей параллельно оси X от вершины щели до свободной поверхности.

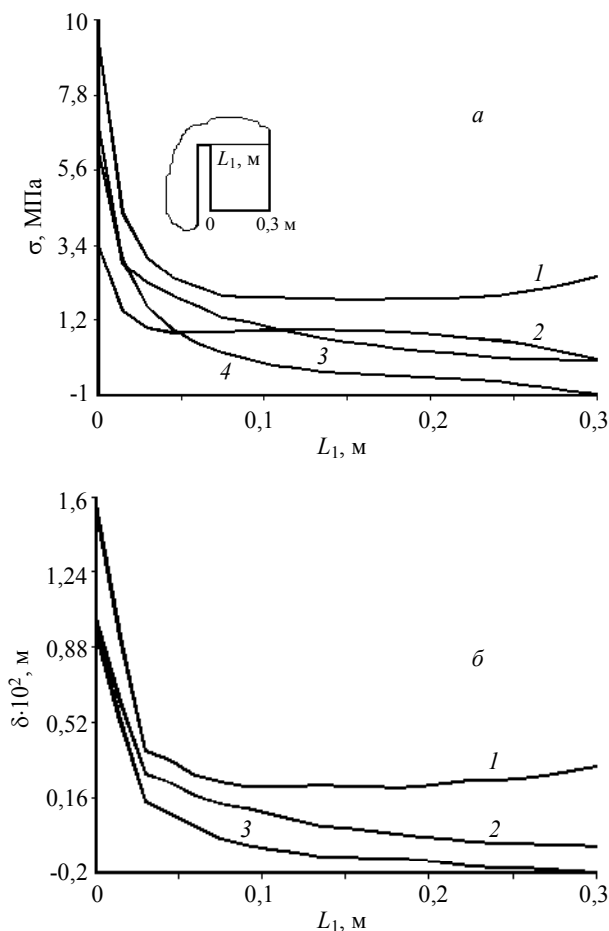


Рис. 4. Изменение напряжений (a , здесь 1, 2, 3, 4 – $\sigma_{\text{экв}}$, σ_{xy} , σ_y , σ_x) и перемещений (b , здесь 1, 2, 3 – $\delta_{\text{экв}}$, δ_y , δ_x) в породном целике вдоль линии L_1

Как видно из представленных зависимостей, наибольшее значение эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, определяющего условие возникновения трещины разрушения, имеет место у основания целика в углу щели, являющемся концентратором напряжений, и составляет 9,6 МПа (рис. 4, a). Другие составляющие поля напряжений в этой точке равны соответственно: $\sigma_{xy} = 3,46$ МПа; $\sigma_y = 6,30$ МПа; $\sigma_x = 7,07$ МПа. По мере перемещения вдоль линии L_1 с выходом на свободную поверхность массива напряжение $\sigma_{\text{экв}}$ снижается до величины 4,36 МПа, σ_y перехо-

дит из растягивающего напряжения в сжимающее и принимает значение $-0,96$ МПа, а σ_{xy} и σ_x приближаются к нулевому значению. Аналогично ведут себя перемещения δ_y и δ_x на этом пути (рис. 4, б), значения которых изменяются соответственно от $0,0105$ м до $-0,0016$ м и от $0,0118$ м до 0 м.

Результаты моделирования процесса функционирования гидромеханической системы «щелевой гидроотрывник – породный целик», выполненного с использованием программы GRAPH-PA, приведены на рис. 5. Как видно из рисунка, на первом этапе происходит разгон и приближение тарелки отрывника к целику. При этом скорость движения тарелки к моменту встречи с породным целиком достигает величины около $0,5$ м/с, усилие возрастает до $0,7 \cdot 10^5$ Н, а ускорение снижается с величины 300 до 100 м/с². Продолжительность этапа составила $0,08$ с.

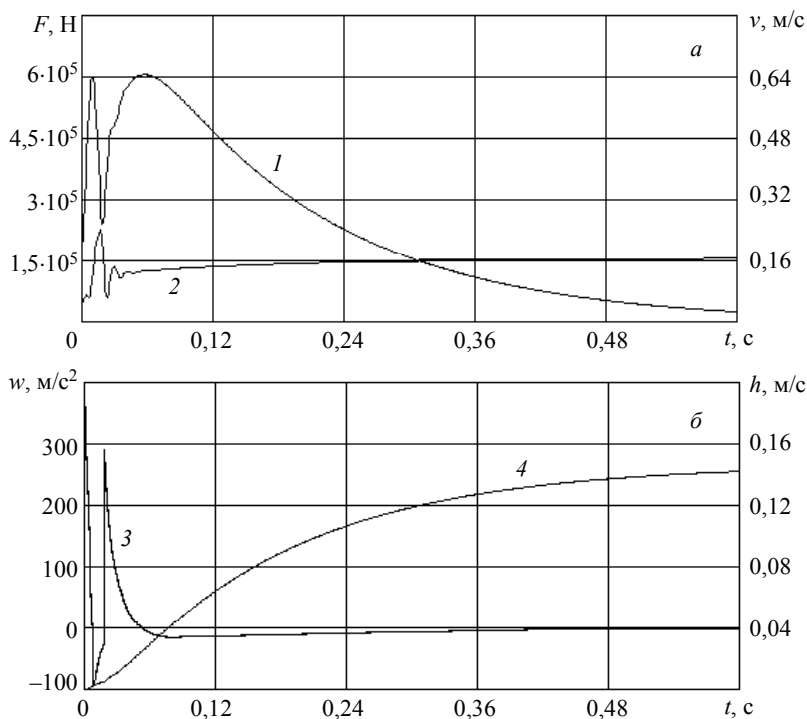


Рис. 5. Зависимости усилия на шток-поршне гидроотрывника (кр. 2), скорости, ускорения и пройденного им пути (кр. 1, 3 и 4, соответственно) от времени в период рабочего хода

На втором этапе движения отрывника происходит деформация и отделение породного целика от массива. При этом время второго этапа зависит от жесткости породного целика и при жесткости, равной $1 \cdot 10^8$ Н/м, составило $0,012$ с. С увеличением жесткости целика время второго этапа уменьшается. Скорость движения шток-поршня на втором этапе вначале возрастает, достигает максимума равного $0,64$ м/с (продолжается разгон рабочего органа, хотя ускорение снижается), а затем, при достижении усилием некоторого значения резко падает до величины около $0,25$ м/с в конце этапа. Ускорение в момент начала снижения скорости движения отрывника достигает наибольшего по абсолютной величине отрица-

тельного значения равного -100 м/с^2 , а к концу этапа несколько увеличивается. Усилие в момент отрыва породного целика достигает своего максимального значения и равно $2,7 \cdot 10^5 \text{ Н}$.

Следует отметить, что с увеличением жесткости породного целика значение скорости движения тарелки отрывника в конце второго этапа будет уменьшаться вплоть до нуля, при этом усилие на шток-поршне будет иметь наибольшее значение. Однако, если жесткость породного целика окажется слишком большой (высокая прочность породы или большая толщина целика), то максимального значения усилия, возникающего на шток-поршне при остановке последнего, может оказаться недостаточно для отрыва такого целика от массива.

Начало третьего этапа аналогично первому. Отличие состоит в том, что в начале третьего этапа скорость движения и усилие на шток-поршне отличны от нуля. Кроме того, в период третьего этапа шток-поршень испытывает дополнительное сопротивление постоянной величины, обусловленное транспортированием оторванного породного целика из зоны разрушения.

Таким образом, проведенные исследования взаимодействия режуще-отрывного рабочего органа с породным целиком дали возможность определить напряженно-деформированное состояние разрушаемого массива и установить значение максимального усилия отрыва, развиваемого гидроприводом рабочего органа с учетом динамической его составляющей, появляющейся в результате торможения тарелки отрывника при отделении породного целика.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Климов Ю.И.* Устойчивость проходческого комбайна с комбинированным режуще-отрывным исполнительным органом // Изв. вузов. Горный журнал. 1984. № 10. С. 72–77.
2. *Климов Ю.И., Бердалин Б.С., Мукушева Г.М.* Результаты исследования устойчивости комбайна при разрушении вязко-пластических горных пород // Активные рабочие органы строительных и дорожных машин: тематич. сб. Караганда: КарПТИ, 1983. С. 38–40.
3. *Шахтные испытания экспериментального проходческого комбайна с алмазным диском и гидравлическим отрывником / В.Д. Ярема, Ю.И. Климов, В.Ф. Атаманов и др. // Совершенствование методов разработки и создание средств комплексной механизации выемки угольных пластов.* Караганда: КарПТИ, 1972. С. 148–150.
4. *Генератор импульсов / Ю.И.Климов, С.В.Серебряков, Ю.В.Морозов и др. // Авт. свид. СССР № 1128006. Б.И. № 45, 1984.*
5. *Климов Ю.И., Бакиров Ж.Б., Мукушева Г.М.* Напряженное состояние породного массива при щелевом отрыве целика // Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030»: Тр. Межд. научн. конф. Караганда: КарГТУ, 1998. С. 453–456.
6. *Системы автоматизированного проектирования: в 9 кн. Кн.4. Математические модели технических объектов: учеб. пособие для вузов / В.А. Трудоношин, Н.В. Пивоварова: под ред. И.П. Норенкова. М.: Высш. шк., 1986. 160 с.*
7. *Типичные анализы. ANSYS 5.0 // Руководство пользователя: пер. с англ. И.Р. Идрисова. Снежинск, 1977. 19 с.*

Статья поступила 17.11.2013 г.

Mutovina N.V., Klimov Yu.I., Smolin A.Yu. INTERACTING OF A FISSURE HYDRODE-TACHING WORKING TOOL WITH A ROCK CRANCH. Results of modeling a hydroseparator with a cropped cranch are presented. The research was performed by use of numerical modelling. The working stroke of the hydroseparator is divided into three characteristic stages according to working conditions of a real tool: the first stage of approach of the separator plate to the pillar; the second stage of deformation and brake-off of the pillar from a massif; and the third stage of transportation of the torn off pillar from a zone of the slot, a retardation and stop of the hydroseparator

stock-piston. The problems are solved using the GRAPH-PA and ANSYS programs. Distribution patterns of the maximum tangential stresses in a massif are obtained. Stress and deformation fields in the cranch and adjacent massif are determined, zones of extension and compression of the cranch are exposed, and the maximum values of equivalent strains are found in the extension zone.

Keywords: modeling, fissure hydrodetaching working tool of a mining machine, combined ways of destruction of a cranch, stress field.

REFERENCES

1. *Klimov Yu.I.* Ustoychivost' prokhodcheskogo kombayna s kombinirovannym rezhushcheotryvnym ispolnitel'nyim organom // *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal*. 1984. No. 10. P. 72–77 (in Russian).
2. *Klimov Yu.I., Berdalin B.S., Mukusheva G.M.* Rezul'taty issledovaniya ustoychivosti kombayna pri razrushenii vyazko-plasticheskikh gornykh porod // *Aktivnye rabochie organy stroitel'nykh i dorozhnykh mashin: tematic. sb.* Karaganda: KarPTI, 1983. P. 38–40 (in Russian).
3. *Shakhtnye ispytaniya eksperimental'nogo prokhodcheskogo kombayna s almaznym diskom i gidravlicheskim otryvnikom* / V.D. Yarema, Yu.I. Klimov, V.F. Atamanov., et al. // *Sovershenstvovanie metodov razrabotki i sozдание sredstv kompleksnoy mekhanizatsii vyemki ugol'nykh plastov*. Karaganda: KarPTI, 1972. P. 148–150 (in Russian).
4. *Generator impul'sov* / Yu.I. Klimov, S.V. Serebryakov, Yu.V. Morozov., et al. // *Avt. svid. SSSR* No. 1128006. B.I. No. 45, 1984 (in Russian).
5. *Klimov Yu.I., Bakirov Zh.B., Mukusheva G.M.* Napryazhennoe sostoyanie porodnogo massiva pri shchelevom otryve tselika // *Nauka i obrazovanie – vedushchiy faktor strategii «Kazakhstan-2030»*: Tr. Mezhd. nauchn. konf. Karaganda: KarGTU, 1998. P. 453–456 (in Russian).
6. *Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya: v 9 kn. Kn. 4. Matematicheskie modeli tekhnicheskikh ob"ektov: ucheb. posobie dlya vtuzov* / V.A. Trudonoshin, N.V. Pivovarova: pod red. I.P. Norenkova. Moscow: Vyssh. shk., 1986. 160 p. (in Russian).
7. *Tipichnye analizy. ANSYS 5.0* // *Rukovodstvo pol'zovatelya: per. s angl.* I.R. Idrisova. Snezhinsk, 1977. 19 p. (in Russian).

MUTOVINA Natalya Victorovna

(Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan Republic)

E-mail: mutovina_natalya@mail.ru

KLIMOV Yuriy Ivanovich

(Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan Republic)

E-mail: klimov_y68@rambler.ru

SMOLIN Alexey Yurievich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)

E-mail: asmolin@ispms.tsc.ru