

# Моделирование взаимодействия шпурового отрывника с разрушаемой средой

<sup>1</sup>КЛИМОВ Юрий Иванович, д.т.н., доцент, klimov\_y68@rambler.ru,

<sup>1</sup>МУТОВИНА Наталья Викторовна, к.т.н., и.о. доцента, mutovina\_natalya@mail.ru,

<sup>1</sup>\*КЛЮЕВА Елена Георгиевна, старший преподаватель, e.klyueva@kstu.kz,

<sup>1</sup>Карагандинский технический университет, Казахстан, 100027, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Цель исследования: определение напряженно-деформированного состояния разрушаемой среды и рабочих элементов шпурового гидроотрывника в режимах распора и отрыва с использованием средств компьютерного моделирования. Статья посвящена разработке имитационной модели системы «разрушаемая среда – шпуровой гидроотрывник» в среде программы ANSYS/Workbench. При моделировании был использован элемент SOLID 92. Разработанная имитационная модель позволяет проводить моделирование с использованием одной модели на макро- и микроуровнях. Рассмотрен принцип работы шпурового гидроотрывника. Описывается взаимодействие шпурового гидроотрывника с породным массивом при его разрушении. Приведена схема сил, действующих на элементы системы «шпуровой гидроотрывник – разрушаемая среда».

**Ключевые слова:** моделирование, шпуровой гидроотрывник, имитационная модель, ANSYS, математическая модель, SOLID 92.

## Введение

Наиболее перспективным направлением создания средств безвзрывного разрушения горных пород является использование принципа крупнокускового разрушения отрывом. Основным преимуществом этого принципа является малая энергоёмкость разрушения, так как порода сопротивляется растягивающим напряжениям в 10-50 раз слабее, чем сжимающим.

Основная трудность в практической реализации этого принципа состоит в необходимости создания дополнительных обнаженных поверхностей в разрушаемом массиве, к которым может быть приложена отрывающая нагрузка. Такие поверхности могут быть созданы путем прорезания в разрушаемой среде узких щелей либо бурением в ней шпуров [2].

Рассмотрим взаимодействие шпурового гидроотрывника с породным массивом при его разрушении. Это устройство может быть использовано при выемке ниш, проведении подготовительных выработок небольшой длины и малого сечения в крепких горных породах, при ремонте горных выработок, где невозможно использование буровзрывного способа [5]. Шпуровые гидроотрывники хорошо зарекомендовали себя на рудниках Среднего Урала при добыче изумрудосодержащих руд, представленных крутопадающими слюдитовыми жилами малой мощности и вмещающими породами крепостью от 3 до 14 по

шкале проф. М.М. Протодьяконова.

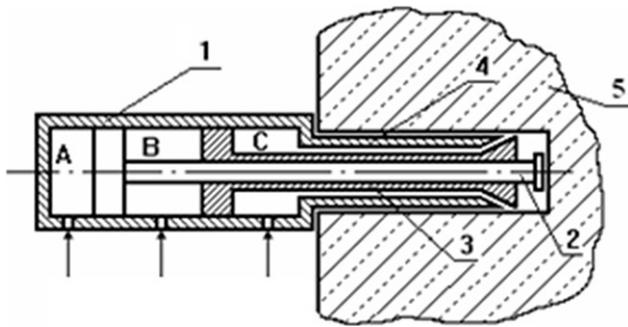
Развитию этого направления до настоящего времени уделялось недостаточно внимания [9]. Это связано со сложностью точного аналитического описания процесса взаимодействия цангового рабочего органа с разрушаемой средой, что затрудняло изучение напряженно-деформированного состояния системы «шпуровой гидроотрывник– разрушаемая среда» и определение на этой основе рациональных параметров рабочего органа шпурового гидроотрывника. Следствием этого является недостаточная надежность работы этих устройств из-за частых поломок цангового рабочего органа, что ограничивает их широкое использование [10].

Целью настоящего исследования является разработка имитационной модели системы «разрушаемая среда – шпуровой гидроотрывник» в среде программы ANSYS/Workbench.

## Материалы и методы исследования

На рисунке 1 представлен шпуровой гидроотрывник, состоящий из силового гидроцилиндра с двумя поршнями. Один поршень связан со штоком, который заканчивается опорной пятой. Другой поршень является полым, он связан со штангой, имеющей обратный конус на конце.

Штанга контактирует обратным конусом с лепестками цанги, которая в свою очередь имеет внутренний конус. Через буквы А, В и С на рисун-



1 – гидроцилиндр; 2 – шток; 3 – штанга; 4 – цанга; 5 – породный целик; А, В и С – отрывная, возвратная и распорная полости

Рисунок 1 – Шпуровой гидравлический отрывник

ке 1 обозначены гидравлические полости, которые образуются поршнями в силовом цилиндре. Через напорные рукава они сообщаются с маслостанцией привода.

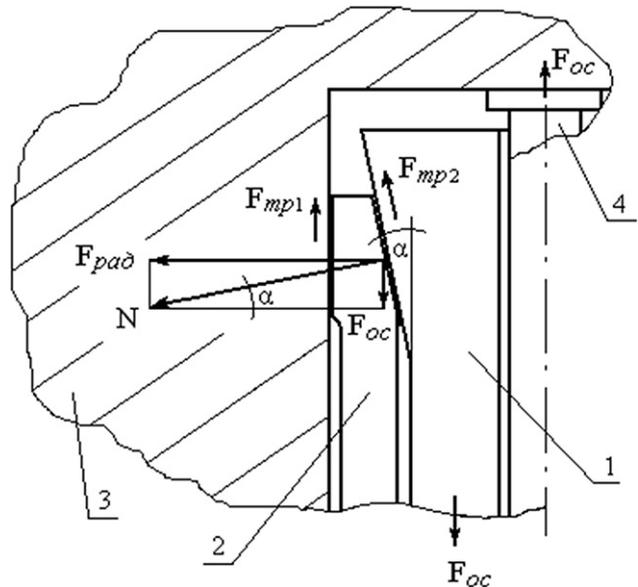
Шпуровой гидроотрывник функционирует следующим образом. Короткий шпур высотой 300-350 мм предварительно пробуривается в породном массиве. После этого в него до упора опорной пяты вставляется рабочий орган гидроотрывника. Имеется три режима работы шпуровой гидроотрывника: режим возврата, режим отрыва и режим распора. Для моделирования наибольший интерес представляют режимы распора и отрыва.

В полость С в режиме распора от насоса под давлением подается рабочая жидкость, перемещающая полой поршень со штангой в направлении от забоя, при этом раздвигая лепестки цанги и прижимая их к боковым стенкам шпура. Таким образом осуществляется распор.

На следующем этапе жидкость под давлением подается под второй поршень в полость А, который, выдвигаясь к забою, упирается своим штоком 2 в дно шпура, при этом цилиндр 1 вместе с захваченной цангой частью массива 5 отходит от забоя – осуществляется режим отрыва породного целика.

Возврат поршней в исходное положение происходит при подаче рабочей жидкости в полость В, а из полостей А и С жидкость вытесняется на слив.

На рисунке 2 показана схема сил, действующих на элементы системы «шпуровой гидроотрывник – разрушаемая среда». Под действием осевой нагрузки  $F_{ос}$ , создаваемой давлением жидкости в полости распора, штанга 1, перемещаясь вниз по схеме, воздействует своим конусом на внутренний конус цанги 2, формируя нормальную силу  $N$  и радиальную (распорную) силу  $F_{рад}$ . При перемещении штанги между конусными поверхностями штанги и цанги возникает сила трения  $F_{тр2}$ . В режиме распора сила  $F_{рад}$  формирует в разрушаемом массиве напряжения сжатия, а



1 – штанга; 2 – цанга; 3 – разрушаемый массив; 4 – шток

Рисунок 2 – Схема действия сил в системе «шпуровой гидроотрывник – разрушаемая среда»

в режиме отрыва – силу трения между цангой и стенками шпура  $F_{тр1}$ .

В режиме отрыва при выдвигании штока 4 до упора в дно шпура и отходе цилиндра с цангой от массива под действием осевой силы  $F_{ос}$ , так как теперь она действует и на шток, и на штангу с цилиндром, происходит отрыв породного целика, захваченного цангой, от массива.

При этом источником всех сил является осевая сила  $F_{ос}$ , а остальные силы определяются, согласно схеме на рисунке 2, по формулам:

- радиальная (распорная) сила:

$$F_{рад} = \frac{F_{ос}}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (1)$$

- нормальная сила:

$$N = \frac{F_{ос}}{\sin \alpha}. \quad (2)$$

Силы трения между цангой и стенками шпура  $F_{тр1}$  и между конусными поверхностями цанги и штанги  $F_{тр2}$ :

$$F_{тр1} = f_{тр1} \frac{F_{ос}}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (3)$$

$$F_{тр2} = f_{тр2} \frac{F_{ос}}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

где  $f_{тр1}$  – коэффициент трения стали по породе;  $f_{тр2}$  – коэффициент трения стали по стали.

Угол конуса  $\alpha$  имеет большое значение для нормального функционирования системы «шпуровой гидроотрывник – разрушаемая среда», так как при определенном соотношении коэффициента трения  $f_{тр1}$  и  $\operatorname{tg} \alpha$  (3) шпуровой отрывник может «выскальзывать» из-за недостаточного сцепления цанги со стенками шпура. При  $f_{тр1} = 0,3$

пределным является угол  $\alpha = 18^\circ$ .

Нами на основании ранее проведенных исследований и из конструктивных соображений угол конуса принят равным  $6^\circ$ . В этом случае будет обеспечено в режиме отрыва условие  $F_{тр1} \geq F_{ор}$ , препятствующее «выскальзыванию» цангового рабочего органа из шпура.

#### Результаты и их обсуждение

Для определения напряженно-деформированного состояния разрушаемой среды и рабочих элементов шпурового гидроотрывника в режимах распора и отрыва разработана имитационная модель системы «разрушаемая среда – шпуровой гидроотрывник» в среде программы ANSYS/Workbench, позволяющей проводить моделирование с использованием одной модели на макро- и микроуровнях [7]. Для моделирования геометрической твердотельной модели с использованием сетки конечных элементов был применен элемент трехмерного моделирования твердых структур SOLID 92, который наиболее подходит для решения поставленной задачи.

Двухуровневая модель адекватно имитирует работу реального устройства, так как в этом случае моделируется взаимодействие рабочего органа с массивом с учетом типа контактных поверхностей между элементами самого отрывника: штангой и цангой и между цангой и стенками шпура с одной стороны, штоком-поршнем с опорной пятой и дном шпура – с другой. Чтобы запустить в работу такую модель, достаточно подать рабочее давление жидкости последовательно в напорные полости согласно схеме (рисунок 1).

В результате моделирования в этом случае имеется возможность определить НДС не только породного массива, но и элементов гидроотрывника. При этом не требуется предварительного расчета нагрузок и определения мест их приложения, так как эта часть работы выполняется программой автоматически и в полном соответствии с процессом функционирования реального объекта [6].

Исходные данные для моделирования были приняты следующие: разрушаемая среда – песчаник с сопротивляемостью разрушению при растяжении  $\sigma_p = 6 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup> и при сжатии  $\sigma_{сж} = 60 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>; длина шпура  $L = 300$  мм; диаметр шпура  $d = 52$  мм; количество лепестков цанги  $n = 4$ ; угол конуса штанги и цанги  $\alpha = 6^\circ$ ; максимальное давление рабочей жидкости  $p = 40$  МПа.

Анализ картины напряжений в массиве показывает, что при распоре образуется вокруг шпура зона сжатия, причем наибольшие напряжения сжатия имеют место непосредственно в зоне контакта цангового рабочего органа с стенкой шпура. Сжатая зона примыкает к зоне растяжения остальной части массива. Напряжения в режиме распора как в зоне сжатия, так и растяжения, не достигают предельных значений и не вызывают разрушений. Исключение – зона растяжения у дна шпура, в которой возможно образование мел-

ких трещин.

При этом в массиве возникают большие напряжения сжатия в зоне контакта лепестков цанги со стенками шпура и напряжения растяжения в местах разреза лепестков цанги. Последние достигают значений, превышающих предел прочности породы на растяжение, и являются причиной появления радиальных трещин, которые при отрыве обуславливают крупность оторванных кусков.

Гораздо более значимые по величине напряжения возникают в элементах шпурового гидроотрывника. Так, конусная штанга испытывает напряжения растяжения от  $70 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup> до  $288 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>. Что касается лепестков цанги, то их внутренняя поверхность при взаимодействии со штангой оказалась сжатой с напряжением в  $433 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup> МПа, а наружная поверхность, контактирующая со стенками шпура, – растянутой с напряжением около  $131 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>. Таким образом, наиболее нагруженными элементами шпурового гидроотрывника, испытывающими наиболее сложную деформацию, являются лепестки цанги, что подтверждается практикой применения этих устройств. Значения напряжений в лепестках цанги достаточно высоки и для их изготовления необходимо применять легированные и хромистые стали с высоким пределом текучести, такие, как сталь 30ХГСА ( $\sigma_T = 490 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>) и 40Х ( $\sigma_T = 785 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>) [4].

При определенных значениях параметров лепестков и воспринимаемых ими усилий напряжения в них могут приблизиться к пределу текучести стали, что может привести к их поломке [8].

Функционирование устройств в режиме отрыва рассмотрим на примере совместной работы двух отрывников. В процессе эксплуатации шпуровых гидроотрывников бывали случаи, когда отрыв части массива не удавалось осуществить из-за недостаточного усилия, развиваемого гидроотрывником. В этом случае на некотором расстоянии пробурился второй шпур, в который вставлялся второй гидроотрывник, и отделение целика от массива производилось одновременно двумя гидроотрывниками [1].

В процессе моделирования определялись напряжения и деформации в массиве при одновременной работе двух шпуровых отрывников, расположенных друг от друга на разных расстояниях (200, 400 и 600 мм). Это дало возможность определить расстояние, при котором совместная работа двух шпуровых отрывников является наиболее эффективной.

Как показали исследования, с увеличением расстояния между гидроотрывниками происходит уменьшение степени их взаимодействия. Так, при расстоянии, равном 200 мм, поля напряжений и деформаций от двух гидроотрывников практически полностью накладываются друг на друга, увеличивая их суммарные значения, однако область массива, подвергнутая напряжению и

деформации невелика, что обуславливает небольшой объем оторванной массы.

При расстояниях между отрывниками 400 и 600 мм зоны напряжений и деформаций, возникающих от действия отрывников, в режиме отрыва объединяются, создавая предпосылки для увеличения объема оторванной массы породы от массива. Взаимное влияние двух одновременно работающих гидроотрывников рассмотрим в режиме отрыва.

По мере увеличения давление жидкости напряжения в массиве возрастает, достигает предела прочности породы на растяжение, что приводит к образованию трещин, которые распространяются вдоль границы между сжатой и растянутой зонами и выходят на свободную поверхность. Происходит отрыв целика породы от массива. Наибольшие напряжения сжатия и растяжения возникают в элементах шпурового гидроотрывника: в штоке и в стенках цилиндра [3].

Сказанное хорошо подтверждается картиной деформаций в массиве на этапе отрыва (рисунок 3). Взаимное влияние гидроотрывников приводит к объединению двух зон деформаций, сформированных вокруг каждого отрывника, в общую зону (светло-серый цвет).

Очевидно, что трещина разрушения пройдет по границе между сжатой (светло-серый цвет) и растянутой (темно-серый цвет) зонами массива. Из рисунка видно, что взаимодействие двух одновременно работающих гидроотрывников приводит к увеличению объема оторванной массы, т.е. к увеличению производительности за один отрыв.

Аналогичные результаты были получены при работе двух гидроотрывников, расположенных на расстоянии 600 мм друг от друга. Однако картина деформаций (рисунок 4) в режиме отрыва показывает, что взаимовлияние отрывников ослабевает из-за «проседания» общей зоны деформации в средней части. Очевидно, что дальнейшее увели-

чение расстояния между гидроотрывниками нецелесообразно, по причине приведения к снижению взаимовлияния двух отрывников и к потере эффекта наложения силовых полей.

В результате проведенных исследований установлены качественная картина и количественные значения напряжений и деформаций в разрушаемой среде и в элементах шпурового гидроотрывника, которые определяют, с одной стороны, условия возникновения и траекторию распространения трещин разрушения в массиве, а с другой – возможность определения рациональных параметров рабочих элементов шпурового гидроотрывника: толщины лепестков цанги и штанги и угла конуса их соприкасающихся поверхностей, обеспечивающих безаварийную работу системы «шпуровой гидроотрывник – разрушаемая среда».

Рациональное расстояние между двумя шпуровыми гидроотрывниками, составляющее 400-500 мм, является важным технологическим и конструктивным параметром для разработки исполнительного органа проходческой машины с использованием принципа шпурового отрыва.

### Заключение

В результате проведенного исследования выполнен анализ состояния работ в области механического разрушения горных пород отрывом от массива. Показано, что наиболее перспективным является механический способ разрушения горных пород отрывом с использованием шпуровых гидроотрывников для безвзрывного разрушения горных пород, монолитов и выполнения других вспомогательных работ горного и строительного производства, позволяющий повысить производительность и безопасность работ в стесненных условиях.

Соотношение радиального (распорного) и осевого (отрывного) усилий определяется раци-

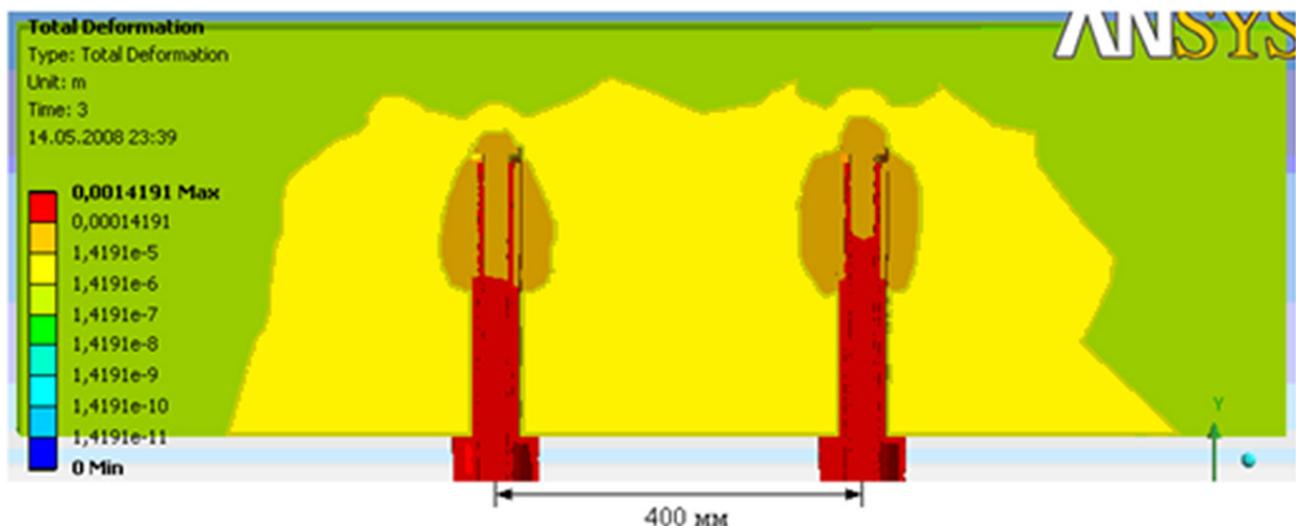


Рисунок 3 – Деформация массива в режиме отрыва при расстоянии между отрывниками 400 мм

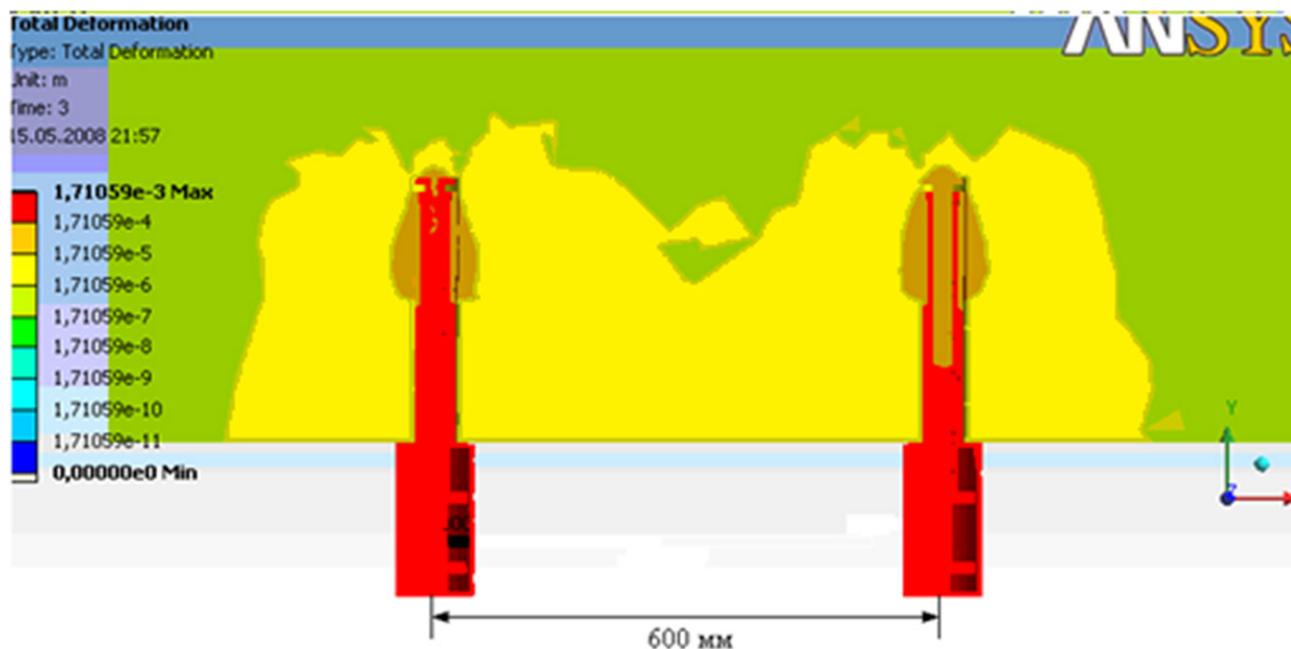


Рисунок 4 – Деформация массива в режиме отрыва при расстоянии между отрывниками 600 мм

ональным углом конуса, составляющим  $60^\circ$ , что обеспечивает формирование напряженно-деформированного состояния породного массива в режимах распора и отрыва, достаточное для нормальной работы «шпуровой гидроотрывник – разрушаемая среда». Установлено, что наиболее нагруженными элементами шпуровой гидроот-

рывника являются лепестки цанги (напряжения сжатия на внутренней поверхности достигают  $433 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ , а на внешней поверхности напряжения растяжения –  $131 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ ) и штанга, в которой напряжения растяжения составляют  $288 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климов Ю.И., Мутовина Н.В. Напряженно-деформированное состояние породного массива при двух одновременно работающих шпуровых гидроотрывниках // Горное оборудование и электромеханика. – М.: Изд-во Новые технологии, 2010. № 8. – С. 52-54.
2. Панжин А.А., Сашурин А.Д. Опыт решения задач геомеханики на горных предприятиях // Инженерная защита. 2016. № S2 (13). С. 88-99.
3. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния породного массива при комбинированной разработке месторождений / А.Д. Сашурин, А.А. Панжин, Ю.П. Коновалова, Н.А. Панжина // Горный журнал. 2018. № 5. С. 43-49.
4. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. 2016. № 5. С. 87-101.
5. Gao Jing-Xiang, Hu Hong Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring // Procedia Earth and Planetary Science. 2009. Vol. 1. Iss. 1. P. 1081-1088.
6. Исследование трещиноватости локальных массивов с помощью средств наземного лазерного сканирования / В.Н. Рождественский, А.А. Панжин, С.Р. Пьянзин, К.А. Кочнев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 5. С. 75-79.
7. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. – Белгород: ИД – Белгород, 2017. – 192 с.
8. Миренков В.Е. О взаимосвязи площади поперечного сечения выработки и области разрушения горных пород // ФТПРПИ. – 2018. – № 1. – С. 32-38.
9. Khoa H.D.V. Numerical Simulation of Spudcan Penetration Using Coupled Eulerian-Lagrangian method // Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics. Taylor & Francis Group. – London, 2014. – С. 199-204.
10. Qiu G., Grabe J. Explicit modeling of cone and strip footing penetration under drained and undrained conditions using a visco-hypoplastic model // Geotechnik. 2012. – Vol. 34. – С. 205-217.

**Шпурлық оқшаулағыш пен бұзылатын ортаның өзара әрекеттесуін модельдеу**<sup>1</sup>**КЛИМОВ Юрий Иванович**, т.ғ.д., доцент, klimov\_y68@rambler.ru,<sup>1</sup>**МУТОВИНА Наталья Викторовна**, т.ғ.к., доцент м.а., mutovina\_natalya@mail.ru,<sup>1</sup>**\*КЛЮЕВА Елена Георгиевна**, аға оқытушы, e.klyueva@kstu.kz,<sup>1</sup>Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан, 100027, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Зерттеу мақсаты: компьютерлік модельдеу құралдарын пайдалана отырып, бұзылатын ортаның кернеулі-деформацияланған жай-күйін және теспелік гидроащқыштың жұмыс элементтерін ажырату және ажырату режимдерінде анықтау. Мақала ANSYS/Workbench бағдарламасының ортасында «бұзылатын орта – шпурлық гидроащқыш» жүйесінің имитациялық моделін әзірлеуге арналған. Модельдеу кезінде SOLID 92 элементі қолданылды. Әзірленген модельдеу моделі макро- және микродеңгейлерде бір модельді қолдана отырып модельдеуге мүмкіндік береді. Шпурлық гидроащқыштың жұмыс принципі қарастырылған. Шпурлық гидроащқыштың тау жыныстарымен бұзылған кезде әрекеттесуі сипатталады. «Шпурлық гидроащқыш – жойылатын орта» жүйесінің элементтеріне әсер ететін күштердің схемасы келтірілген.

**Кілт сөздер:** модельдеу, гидрооқшаулағыш, имитациялық моделі, ANSYS, математикалық моделі, SOLID 92.

**Simulation of Interaction Between Holes and Breakers with Destructible Environment**<sup>1</sup>**KLIMOV Yuriy**, Dr. Tech. Sci., Assistant Professor, klimov\_y68@rambler.ru,<sup>1</sup>**MUTOVINA Natalya**, Cand. Tech. Sci., Assistant Professor, mutovina\_natalya@mail.ru,<sup>1</sup>**\*KLYUYEVA Yelena**, Senior Lecturer, e.klyueva@kstu.kz,<sup>1</sup>Karaganda Technical University, Kazakhstan, 100027, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

\*corresponding author.

**Abstract.** The purpose of the study: determination of the stress-strain state of the destructible medium and the working elements of the borehole hydraulic breaker in the modes of expansion and separation using computer modeling tools. The article is devoted to the development of a simulation model of the system «destructible medium – blasthole hydraulic breaker» in the environment of the ANSYS/Workbench program. The SOLID 92 element was used in the modeling. The developed simulation model allows modeling using one model at the macro and micro levels. The principle of operation of a borehole hydraulic separator is considered. The interaction of a borehole hydraulic separator with a rock mass during its destruction is described. A diagram of the forces acting on the elements of the system «borehole hydraulic breaker – destructible medium» is given.

**Keywords:** modeling, hole hydraulic breaker, simulation model, ANSYS, mathematical model, SOLID 92.

**REFERENCES**

1. Klimov Yu.I., Mutovina N.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie porodnogo massiva pri dvuh odnovremennno rabotayushchih shpurovnyh gidrootryvnikah // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – Moscow: Publ. Novye tekhnologii, 2010. No. 8. – pp. 52-54.
2. Panzhin A.A., Sashurin A.D. Opyt resheniya zadach geomekhaniki na gornyyh predpriyatiyah // Inzhenernaya zashchita. 2016. No. S2 (13). pp. 88-99.
3. Osobennosti formirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya porodnogo massiva pri kombinirovannoy razrabotke mestorozhdenij / A.D. Sashurin, A.A. Panzhin, Yu.P. Konovalova, N.A. Panzhina // Gornyy zhurnal. 2018. No. 5. pp. 43-49.
4. Kuz'min Yu. O. Sovremennaya geodinamika opasnykh razlomov // Fizika Zemli. 2016. No. 5. pp. 87-101.
5. Gao Jing-Xiang, Hu Hong Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring // Procedia Earth and Planetary Science. 2009. Vol. 1. Iss. 1. pp. 1081-1088.
6. Issledovanie treshchinovosti lokal'nykh massivov s pomoshch'yu sredstv nazemnogo lazernogo skanirovaniya / V.N. Rozhdestvenskiy, A.A. Panzhin, S.R. P'yanzin, K.A. Kochnev // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Gornyy zhurnal. 2014. No. 5. pp. 75-79.
7. Tyupin V.N. Vzryvnye i geomekhanicheskie processy v treshchinovatykh napryazhennykh gornyyh massivah. – Belgorod: ID – Belgorod, 2017. – 192 p.
8. Mirenkov V.E. O vzaimosvyazi ploshchadi poperechnogo secheniya vyrabotki i oblasti razrusheniya gornyyh porod // FTPRPI. – 2018. – No. 1. – pp. 32-38.
9. Khoa H.D.V. Numerical Simulation of Spudcan Penetration Using Coupled Eulerian-Lagrangian method // Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics. Taylor & Francis Group. – London, 2014. – pp. 199-204.
10. Qiu G., Grabe J. Explicit modeling of cone and strip footing penetration under drained and undrained conditions using a visco-hypoplastic model // Geotechnik. 2012. – Vol. 34. – pp. 205-217.