ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(6):120-132
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.23.05 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_120

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДРЕНИЯ КЛИНЬЕВ РАЗНОЙ ФОРМЫ В ПОРОДНЫЙ МАССИВ ПРИ ОСЕВОЙ И ВИНТОВОЙ СХЕМАХ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Н.И. Сысоев[1], А.А. Гринько[1], Д.А. Гринько[1]

[1] Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия, e-mail: nextdingo@mail.ru

Аннотация: Представлены результаты математического и физического моделирования процесса внедрения клиньев симметричной и асимметричной форм по осевой и винтовой траекториям вектора ударной нагрузки в породный массив при ударном нагружении. Сравнительный анализ контактных напряжений по Мизесу, возникающих в породном массиве при моделировании методом конечных элементов, показал, что при ударном нагружении клиньев (особенно ассиметричных) по винтовой траектории наблюдается увеличение значений сдвиговых напряжений в породе. С помощью физического моделирования на специально изготовленном стенде было подтверждено повышение эффективности сколообразования при использовании инструмента в виде клина асимметричной формы, внедряемого по винтовой траектории вектора ударной нагрузки в породный массив. Сравнение числовых значений энергоемкости разрушения показало, что энергоемкость разрушения при винтовой траектории вектора ударной нагрузки асимметричным клином в среднем в 1,15 раз меньше, чем клином симметричной формы, и в 1,45 раза меньше, чем при осевом нагружении этих клиньев. Это дает основание к созданию соответствующих ударно-поворотных механизмов и буровых инструментов, обеспечивающих бурение шпуров и скважин машинами ударного способа бурения.

Ключевые слова: математическое моделирование, физическое моделирование, симметричный клин, асимметричный клин, осевая траектория удара, винтовая траектория удара, породный массив, скол, энергоемкость разрушения.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90079.

Для цитирования: *Сысоев Н. И., Гринько А. А., Гринько Д. А.* Моделирование процесса внедрения клиньев разной формы в породный массив при осевой и винтовой схемах ударного нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 120–132. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_120.

Modeling different-shape wedge penetration in rock mass under axial and spiral shock loading

N.I. Sysoev[1], A.A. Grinko[1], D.A. Grinko[1]

[1] M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia, e-mail: nextdingo@mail.ru

© Н.И. Сысоев, А.А. Гринько, Д.А. Гринько. 2021.

Abstract: The article presents the mathematical modeling and physical simulation data on symmetrical and asymmetrical wedge penetration in rock mass under shock loading along the axial and spiral trajectories. The comparative analysis of von Mises stresses in rock mass in the finite element modeling shows that under the shock loading of wedges (especially, asymmetrical wedges) along the spiral trajectory, the values of the shear stresses in rock mass increase. Physical simulation on a dedicated test bench proved the increased efficiency of shearing with the asymmetrical wedge penetrated in rock mass under the shock loading along the spiral trajectory. The comparison of the numerical values of energy inputs for fracture showed that the energy input for fracture with the asymmetrical wedge penetrated under the shock loading along the spiral trajectory were 1.5 times lower than with the symmetrical wedge and 1.45 times less than in the axial loading of wedges. This offers grounds for engineering appropriate rotary–percussive mechanisms and drilling tools.

Key words: mathematical modeling, physical simulation, symmetrical wedge, asymmetrical wedge, axial shock trajectory, spiral shock trajectory, rock mass, shear, energy input for fracture.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 19-35-90079.

For citation: Sysoev N. I., Grinko A. A., Grinko D. A. Modeling different-shape wedge penetration in rock mass under axial and spiral shock loading. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(6):120-132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_120.

Введение

Бурение шпуров и скважин широко используется при разработке месторождений полезных ископаемых, их разведке и проведении прочих горных и строительных работ. Столь обширная область применения бурения требует постоянного совершенствования применяемой технологии и техники, что на фоне ежегодно увеличивающихся объемов бурения приобретает важное значение. Одним из возможных способов повышения эффективности ударно-поворотного бурения крепких пород является совершенствование схем силового воздействия в системе «буровой инструмент-породный массив», при которой улучшается соотношение долей дробимой и скалываемой породы. При увеличении доли крупных сколов породы энергоемкость разрушения будет снижаться и, как следствие, приведет к повышению скорости бурения. Этому посвящены многочисленные исследования [1 — 5], в результате которых установлены рациональные параметры между энергией, частотой приложения ударных нагружений к инструменту и углами поворота инструмента между ударами. Однако не все резервы ударно-поворотного бурения при этом были исчерпаны. Современные методы математического моделирования позволяют «заглянуть» под кромку резца или долота и установить неизвестные ранее закономерности формирования напряженного состояния породного массива, обусловленное воздействием внедряемого в него инструмента. Одним из таких резервов, на наш взгляд, является изменение траектории внедрения рабочих кромок долота в породный массив с прямолинейной на винтообразную. При этом энергоемкость процесса бурения породы должна снизиться.

Многолетними наблюдениями было установлено, что каждые 10 лет проис-

ходит повышение коэффициента крепости разрушаемой породы на одну категорию. Это происходит по причине ежегодного увеличения глубины горных работ. На сегодняшний день доля пород с крепостью f = 15—16 (по шкале профессора М.М. Протодьяконова) составляет около 58—60% от всех объемов горнопроходческих работ [6]. Следовательно, с повышением прочности пород необходимо разрабатывать менее энергоемкие способы их бурения.

Идея работы заключается во внедрении клина в поверхность породного массива по геликоидальной (винтовой с большим шагом) траектории, что позволит обеспечить повышение эффективности процесса сколообразования при ударно-поворотном способе бурения.

Цель работы

Провести исследования по внедрению клина симметричной и асимметричной формы в породный массив по осевой и винтовой траектории. Математическим моделированием установить влияние этих факторов на напряженно-деформированное состояние породного массива, а с помощью физического моделирования исследовать влияние изменения траектории внедрения клина и его геометрии на эффективность сколообразования.

Математическое моделирование

Для решения поставленной задачи была использована программа конечно-элементного анализа Abaqus/CAE. В качестве модели разрушения была выбрана упругопластическая модель Друкера-Прагера [7]. Эта модель успешно была применена при исследовании процесса взаимодействия резца с породным массивом при вращательном бурении [8—10]. Однако для рассматриваемого объекта потребовалось учесть особенности траектории движения рабочих кромок долота и силового воздействия его на породный массив. Прочностными характеристиками горной породы в данной модели являются удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ. Удельное сцепление C — показатель вязкости горной породы, при котором порода выдерживает касательные напряжения, не разрушаясь при сдвиге. Угол внутреннего трения φ — угол, характеризующий трение между контактирующими частицами внутри структуры горной породы. Так как в используемой модели разрушения за основу было принято параболическое описание функций, то можно применить следующие уравнения:

$$C = B\sigma_p \qquad (1)$$

$$\varphi = 2\left(arctg\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}\frac{1}{2B} - 45^0 \right) \qquad (2)$$

где $\sigma_р$ — предел прочности на растяжение, МПа; $\sigma_{сж}$ — предел прочности на сжатие, МПа.

$$B = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} + 1} - 1 \qquad (3)$$

Сцепление C, МПа выражается через прочность при одноосном сжатии соотношением:

$$C = \sigma_{сж}\left((1-\sin\varphi)/2\cos\varphi\right)/2\cos\varphi \quad (4)$$

где φ — угол внутреннего трения, град.

Исходные параметры свойств горной породы, используемой при выполнении моделирования, приведены в таблице. Граничные условия модели: нижнее, левое и правое плоскости породы закреплены неподвижно. Скорость движения клина V составляет 2 м/с, а время выполнения расчета $t_{расч}$ — 10 мс. В качестве породы имитировался мрамор, так как на этапе физического моделирования использовалась именно эта порода. Благодаря достаточно стабильным физико-механическим характеристикам мрамора удалось с хорошей наглядностью

Исходные параметры свойств горной породы
Initial properties of rocks

Тип породы	Объемная масса ρ, кг/м³	Модуль сдвига *G*, ГПа	Коэффициент Пуассона υ	Удельное сцепление *C*, МПа	Угол внутреннего трения φ, град
Мрамор	2650	32,5	0,22	43,7	38

и достаточной точностью исследовать образование сколов породы в результате силового воздействия на нее клиньев, имитирующих буровые инструменты.

В качестве испытуемых моделей взяты клинья симметричной и асимметричной формы. На рис. 1 представлены клинья симметричной и асимметричной формы. Симметричный клин (рис. 1, *а*) имел угол заострения β = 80° и диаметр 8,5 мм. По такой схеме выполнены конструкции буровых долот для ударного бурения [2]. Учитывая, что в нашем случае буровой инструмент предполагается внедрять с поворотом, целесообразно форму клина принять ассиметричной (рис. 1, *б*), то есть такой, у которой рабочая часть разделена пополам, а каждая половина имеет неодинаковые, но взаимно противоположные по величине углы заточки.

Угол наклона задней грани относительно оси клина составлял 45°, а передней 35°. Угол поворота относительно оси инструмента при внедрении составлял 30°. Внедрение асимметричного клина в породный массив по винтовой траектории обеспечивает контактное взаимодействие клина с породой, при котором напряженное состояние усиливается в направлении поворота инструмента. Более заостренная грань клина по направлению его вращения обеспечивает в массиве породы создание больших скалывающих напряжений [11, 12].

Сущность математического моделирования состояла в имитации внедрения данных клиньев в породу и изучении напряженно-деформируемых полей в породном массиве. При моделировании клинья внедрялись в породный массив на глубину 10 мм за время выполнения расчета $t_{расч}$, равное 10 мс. Плотность сетки породного массива составляла 0,5 мм.

На рис. 2 (см. Приложение, с. 131) представлены картины напряженно-де-

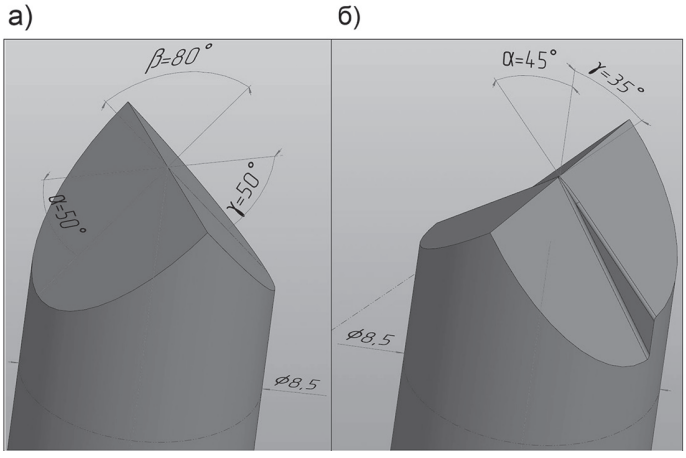

Рис. 1. Клинья симметричной (а) и асимметричной (б) формы
Fig. 1. Wedges of symmetrical (a) and asymmetrical (b) shape

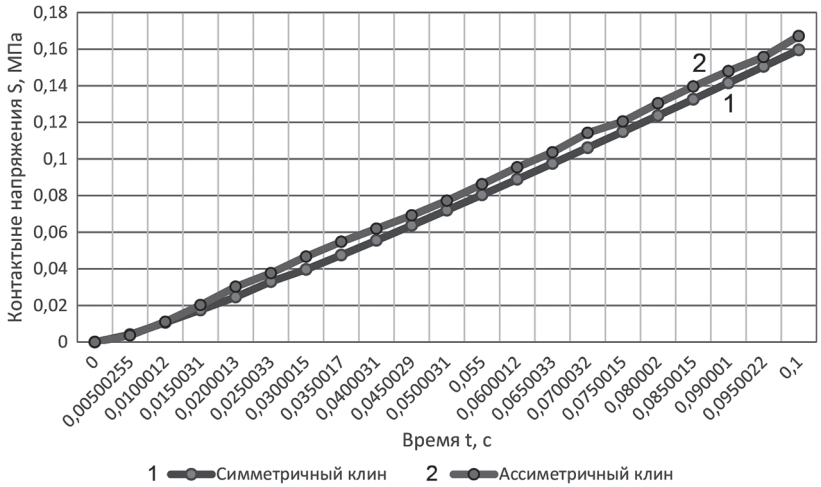

Рис. 3. График зависимости эквивалентных контактных напряжений по Мизесу при внедрении клина симметричной и асимметричной формы по осевой траектории

Fig. 3. Plot of von Mises equivalent stresses in penetration of symmetrical and asymmetrical wedges along axial trajectory

формированного состояния породы при внедрении клина симметричной (рис. 2, *а*) и асимметричной формы (рис. 2, *б*) по осевой траектории.

Из рис. 2 видно, что напряженно-деформированные поля, возникающие в породном массиве в результате внедрения клиньев, примерно одинаковы в обоих случаях [13, 14].

На рис. 3 представлен график зависимости эквивалентных контактных напряжений по Мизесу при внедрении клина симметричной и асимметричной формы по осевой траектории.

Данный график показывает сравнительную характеристику контактных напряжений при различных траекториях внедрения в породный массив. Из рис. 3 видно, что контактные напряжения, образующиеся в породе в результате внедрения симметричного и асимметричного клиньев, примерно одинаковы в числовых значениях.

Если буровой инструмент внедряется в поверхность породного массива по винтовой траектории, то в разбуриваемой породе создаются дополнительные напряжения сдвига, что обеспечивает менее энергоемкий процесс разрушения, а следовательно, и более высокую скорость бурения [15—17]. От такого комбинированного воздействия доля дробимой породы уменьшится, а доля породы, отделяемой от забоя крупными сколами, увеличится, что в совокупности позволит снизить энергоемкость процесса разрушения в сравнении с классической траекторией внедрения бурового инструмента в породный массив по осевой траектории, как в случае ударно-поворотного бурения.

Картины напряженно-деформированного состояния породы при внедрении клина симметричной (рис. 4, *а*) и асимметричной формы (рис. 4, *б*) по винтовой траектории представлены на рис. 4 (см. Приложение, с. 131).

Из рис. 4 видно, что при данном силовом воздействии формируются дополнительные поля напряженно-деформированного состояния, что указывает на формирование потенциально более крупного скола в сравнении с осевой траекторией внедрением клина в породу.

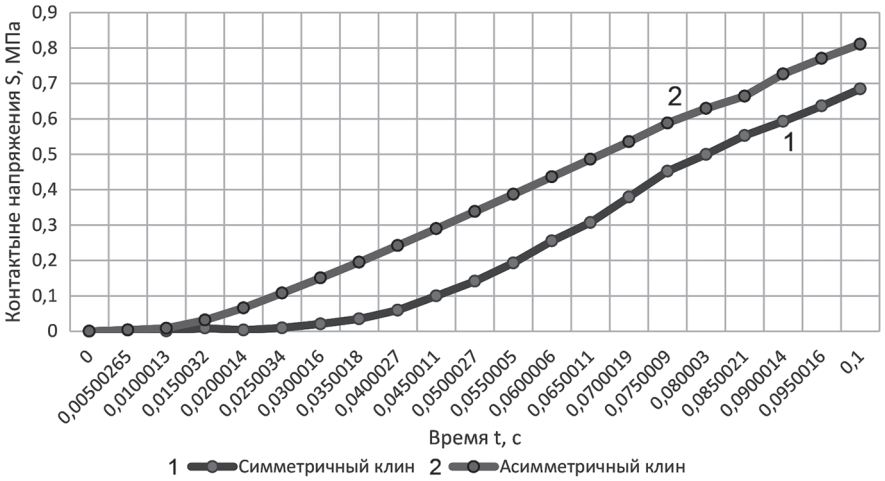

Рис. 5. График зависимости эквивалентных контактных напряжений по Мизесу при внедрении клина симметричной и асимметричной формы по винтовой траектории

Fig. 5. Plot of von Mises equivalent stresses in penetration of symmetrical and asymmetrical wedges along spiral trajectory

На рис. 5 представлен график зависимости эквивалентных контактных напряжений по Мизесу при внедрении клина симметричной и асимметричной формы по винтовой траектории. Из графика видно, что винтовая траектория удара увеличивает значения контактных напряжений в породе при использовании асимметричного клина в сравнении с симметричным. Это дает основание считать, что для формирования больших сдвиговых напряжений в породе при внедрении клина по винтовой траектории необходимо использовать асимметричную форму.

Для подтверждения эффективности внедрения бурового инструмента по винтовой траектории и создании больших значений контактных напряжений в породном массиве, в сравнении с осевой траекторией ударной нагрузки, методом физического моделирования проведены исследования по установлению зависимостей массы сколов породы от энергии удара в сочетании с различными траекториями ударных нагрузок и формы клиньев.

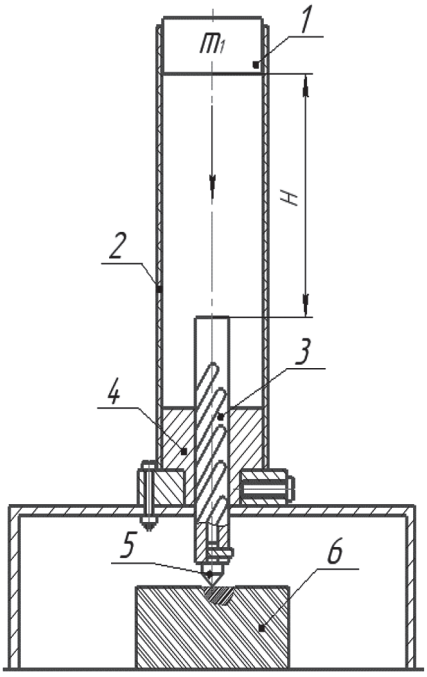

Рис. 6. Схема стенда: 1 — груз; 2 — направляющая труба; 3 — геликоидальный стержень; 4 — геликоидальная втулка; 5 — клин; 6 — образец породы

Fig. 6. Test bench: 1 — load; 2 — guide tube; 3 — helical bar; 4 — helical sleeve; 5 — wedge; 6 — rock specimen

Физическое моделирование

Для исследования влияния изменения траектории внедрения клина и его геометрии на эффективность сколообразования был разработан специальный стенд, представленный на рис. 6. Стенд состоит из груза *1* массой m_1, направляющей трубы *2*, геликоидального стержня *3*, геликоидальной втулки *4*, клина *5* и образца породы 6. При сбрасывании груза *1* массой m_1 с высоты *H*, геликоидальный стержень *3*, перемещаясь в геликоидальной втулке *4* через клин *5*, передает на поверхность породного массива *6* энергию удара *E*, формирующую скол. Так как результаты математического моделирования подтвердили целесообразность внедрения клина по винтовой траектории, то в разработанном стенде имеются геликоидальная втулка и стержень, что обеспечивает возможность внедрения клина в породный массив по винтовой траектории, а применение цилиндрических стержня и втулки позволяют только осевое внедрение. Клин *5* применялся в двух видах — с симметричной и ассиметричной геометрией. После нанесения удара продукты скола горной породы взвешивались на весах с точностью до 0,01 г.

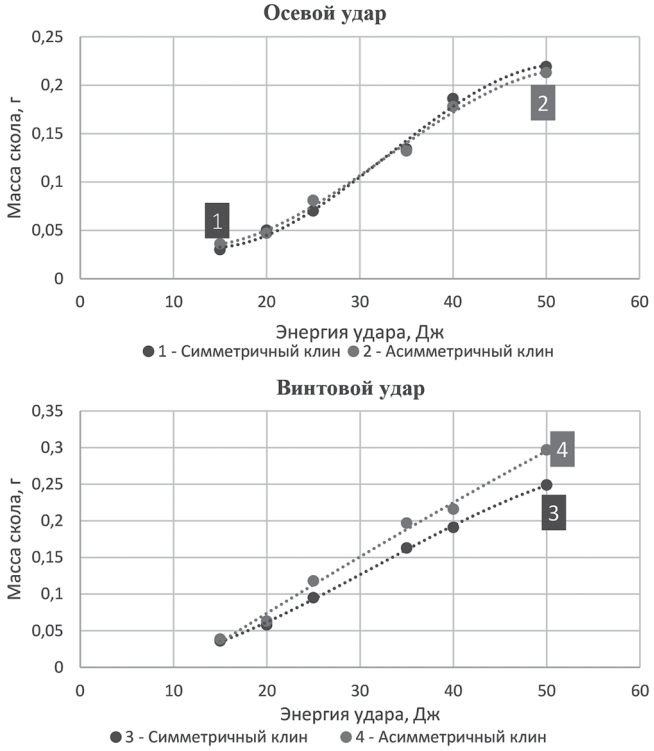

Рис. 9. Графики зависимостей массы продуктов скола от энергии удара по осевой и винтовой траекториям внедрения симметричного и асимметричного клиньев: 1 — $y = -7E-06x^3 + 0{,}0007x^2 - 0{,}0156x + 0{,}1324$; $R^2 = 0{,}9941$; 2 — $y = -5E-06x^3 + 0{,}0005x^2 - 0{,}0109x + 0{,}0959$; $R^2 = 0{,}9943$; 3 — $y = -7E-06x^3 + 0{,}0006x^2 - 0{,}0099x + 0{,}0703$; $R^2 = 0{,}9995$; 4 — $y = -2E-05x^3 + 0{,}0013x^2 - 0{,}0239x + 0{,}1598$; $R^2 = 0{,}9978$

Fig. 9. Mass of chips in shearing versus shock energy in axial and spiral trajectory penetration of symmetrical and asymmetrical wedges: 1 — $y = -7E-06x^3 + 0{,}0007x^2 - 0{,}0156x + 0{,}1324$; $R^2 = 0{,}9941$; 2 — $y = -5E-06x^3 + 0{,}0005x^2 - 0{,}0109x + 0{,}0959$; $R^2 = 0{,}9943$; 3 — $y = -7E-06x^3 + 0{,}0006x^2 - 0{,}0099x + 0{,}0703$; $R^2 = 0{,}9995$; 4 — $y = -2E-05x^3 + 0{,}0013x^2 - 0{,}0239x + 0{,}1598$; $R^2 = 0{,}9978$

Изменение энергии удара осуществлялось изменением массы груза *1*.

Результаты экспериментальных исследований

Для определения влияния формы клина и траектории его внедрения в породный массив на объем образуемой лунки (массу отделенной породы) было проведено по 10 опытов на каждое сочетание. На рис. 7 и 8 (см. Приложение, с. 132) представлены виды лунок (в плане) как следствие внедрения в поверхность породного образца клиньев симметричной и асимметричной форм по осевой и винтовой траекториям. Энергия удара составляла 50 Дж. На рис. 7 видно, что лунки, образованные в результате удара клиньев разных форм по осевой траектории, примерно равны по форме и объемам.

При перемещении клина по винтовой траектории в породном массиве образовывались лунки большего объема. Это связано с возникновением дополнительных касательных напряжений, что подтверждено также математическим моделированием (представлено на рис. 4).

Формы и размеры лунок в плане при внедрении клиньев в породный массив

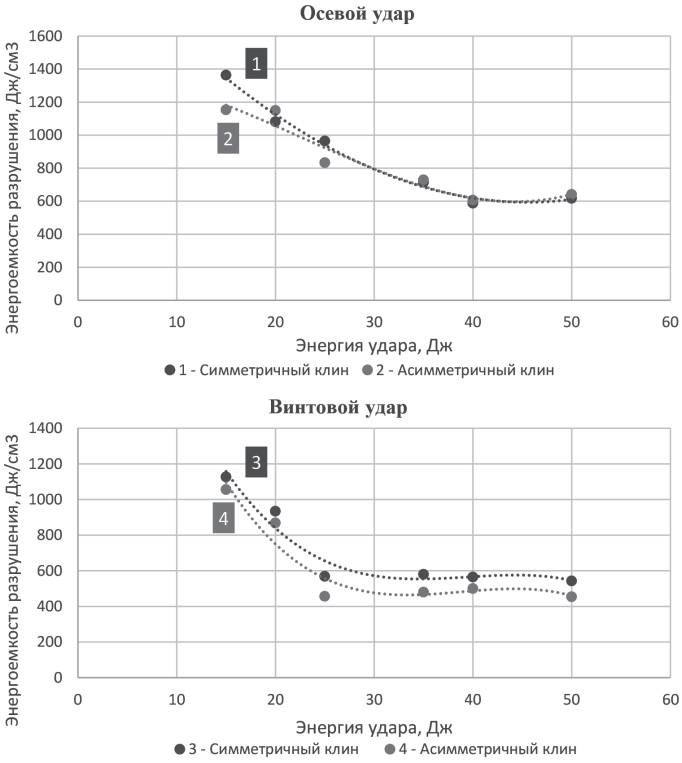

Рис. 10. График зависимостей энергоемкости разрушения от энергии удара при осевой и винтовой траекториям внедрения симметричного и асимметричного клиньев: 1 — $y = 0{,}0017x^3 + 0{,}6271x^2 - 67{,}74x + 2214{,}8$; $R^2 = 0{,}9902$; 2 — $y = 0{,}0194x^3 - 1{,}3282x^2 + 3{,}5178x + 1362$; $R^2 = 0{,}9359$; 3 — $y = -0{,}0463x^3 + 5{,}4745x^2 - 212{,}47x + 3268{,}9$; $R^2 = 0{,}9414$; 4 — $y = -0{,}054x^3 + 6{,}2851x^2 - 239{,}07x + 3449{,}6$; $R^2 = 0{,}9229$

Fig. 10. Energy inputs for fracture versus shock energy in axial and spiral trajectory penetration of symmetrical and asymmetrical wedges: 1 — $y = 0{,}0017x^3 + 0{,}6271x^2 - 67{,}74x + 2214{,}8$; $R^2 = 0{,}9902$; 2 — $y = 0{,}0194x^3 - 1{,}3282x^2 + 3{,}5178x + 1362$; $R^2 = 0{,}9359$; 3 — $y = -0{,}0463x^3 + 5{,}4745x^2 - 212{,}47x + 3268{,}9$; $R^2 = 0{,}9414$; 4 — $y = -0{,}054x^3 + 6{,}2851x^2 - 239{,}07x + 3449{,}6$; $R^2 = 0{,}9229$

по винтовой траектории представлены на рис. 8. Из рис. видно, что при внедрении асимметричного клина по винтовой траектории внедрения на породном образце формируются лунки большего размера.

На рис. 9 представлены графики средних значений масс продуктов скола мрамора в зависимости от энергии удара и геометрии клиньев, из которых видно, что эффективность сколообразования наглядно проявляется при внедрении ассиметричных клиньев по винтовой траектории.

Для сравнения энергоемкости разрушения породы при разных сочетаниях траектории ударной нагрузки и формы клина были определены значения удельных затрат энергии на совершение сколов. На рис. 10 представлен график зависимостей энергоемкости разрушения от энергии удара. Как видно из графика, значения энергоемкости разрушения при осевой траектории ударной нагрузки клиньями симметричной и асимметричной форм примерно одинаковы. В случае, когда клин внедрялся в породный массив по винтовой траектории вектора ударной нагрузки, наблюдалось снижение значений энергоемкости разрушения при всех уровнях энергии удара (рис. 10). Энергоемкость разрушения при винтовой траектории вектора ударной нагрузки асимметричным клином в среднем в 1,15 раз меньше, чем клином симметричной формы, и в 1,45 раза меньше, чем при осевом нагружении этих клиньев.

Заключение

Математическим и физическим моделированием внедрения в породный массив клиньев с симметричной и асимметричной формами по осевой и винтовой траекториям установлены закономерности, свидетельствующие о наличии эффекта повышения сколообразования, присущего инструменту в виде клина асимметричной формы, внедряемого по винтовой траектории. При таком способе внедрения асимметричного клина в породном массиве возникают дополнительные контактные сдвиговые напряжения, обеспечивающие формирование более крупных сколов породы и, как следствие, снижение удельных затрат энергии. При винтовой траектории вектора ударной нагрузки асимметричным клином числовые значения энергоемкости уменьшились в среднем в 1,15 раза, чем при воздействии клином симметричной формы, и в 1,45 раз, чем при осевом нагружении этих клиньев. Это дает основание к созданию соответствующих ударно-поворотных механизмов и буровых инструментов для более эффективных машин ударного бурения шпуров и скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алимов О. Д.*, *Дворников Л. Т.* Бурильные машины. — М.: Машиностроение, 1976. — С. 295.

2. *Юнгмейстер Д. А.*, *Уразбахтин Р. Ю.*, *Мельников Д. А.* Горные машины с модернизированными конструкциями ударных исполнительных органов / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник научных статей XV Международной научно-технической конференции. — 2017. — С. 124—128.

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

4. *Лукьянов В. Г.*, *Крец В. Г.* Горные машины и проведение горно-разведочных выработок: учебник для СПО. — М.: Изд-во Юрайт, 2016. — 342 с.

5. *Хазанович Г. Ш.* Актуальные направления научных исследований горнопроходческого оборудования // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 2(136). — С. 41—45.

6. *Додис Я. М.*, *Нифадьев В. И.* Разрушение горных пород при бурении и взрывании. Учебное пособие. — Бишкек: КРСУ, 2006. — 374 с.

7. *Чу Ким Хунг* Метод расчета показателей эффективности функционирования и надежности резцов для бурения шпуров: дис. канд. техн. наук: 05.05.06. — ЮРГПУ(НПИ), Новочеркасск, 2016. — 155 с.

8. *Сысоев Н. И.*, *Чу Ким Хунг* Численное моделирование процесса бурения шпура горных пород с применением упруго-пластической модели // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 3. — С. 142—152.

9. *Сысоев Н. И.*, *Чу Ким Хунг* Применение метода конечных элементов для определения конструктивных параметров буровых резцов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2015. — № 4. — С. 73—80.

10. *Сысоев Н. И.*, *Буренков Н. Н.*, *Чу Ким Хунг* Обоснование структуры и выбор рациональных конструктивных параметров бурового резца, армированного алмазно-твердосплавными пластинами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2016. — № 2. — С. 77—83.

11. *Гринько А. А.*, *Сысоев Н. И.*, *Гринько Д. А.* Повышение эффективности процесса сколообразования при ударно-поворотном воздействии долота на горную породу // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 9. — С. 102–115. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-102-115.

12. *Pryhorovska T. O., Chaplinskiy S. S.*, *Kudriavtsev I. O.* Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits // Petroleum exploration and development. 2015, vol. 42, no. 6, pp. 888—892.

13. *Guohui Lia, Wenjin Wanga, Zhijuan Jinga, Leibin Zuoa, Fubin Wangb, Zhen Weia* Mechanism and numerical analysis of cutting rock and soil by TBM cutting tools // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 81, pp. 428–437.

14. *Nina Yari, Marcin Kapitaniak, Vahid Vaziri, Lifeng Ma, Marian Wiercigroch* Calibrated FEM modelling of rock cutting with PDC cutter // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 148, article 16006.

15. *Helmons R. L. J., Miedema S. A., van Rhee C.* Modeling the effect of water depth on rock cutting processes with the use of discrete element method // Terra et Aqua. 2016, vol. 142, no. 17.

16. *Che D., Zhu W.-L., Ehmann K. F.* Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // International Journal of Mechanical Sciences. 2016, vol. 119, pp. 224—236.

17. *Cheng Z., Sheng M., Li G.* Cracks imaging in linear cutting tests with a PDC cutter: Characteristics and development sequence of cracks in the rock // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019, vol. 179, no. 6. ГИАБ

REFERENCES

1. Alimov O. D., Dvornikov L. T. *Buril'nye mashiny* [Drilling machines], Moscow, Mashinostroenie, 1976, pp. 295.

2. Yungmeyster D. A., Urazbakhtin R. Yu., Mel'nikov D. A. Mining machines with modernized designs of percussion tools. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: sbornik nauchnykh statey XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technological equipment for the mining and oil and gas industry: XV International scientific–technical conference proceedings], 2017, pp. 124—128. [In Russ].

3. Krapivin M. G., Rakov I. Ya., Sysoev N. I. *Gornye instrumenty*. 3-e izd. [Mining instruments, 3rd ed.], Moscow, Nedra, 1990, 256 p.

4. Luk'yanov V. G., Krets V. G. *Gornye mashiny i provedenie gorno-razvedochnykh vyrabotok: uchebnik dlya SPO* [Mining machines and prospecting holes: vocational education. Textbook], Moscow, Izd-vo Yurayt, 2016, 342 p.

5. Khazanovich G. Sh. Actual directions of scientific research of mining equipment. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2018, no. 2(136), pp. 41—45. [In Russ].

6. Dodis Ya. M., Nifad'ev V. I. *Razrushenie gornykh porod pri burenii i vzryvanii*. Uchebnoe posobie [Destruction of rocks during drilling and blasting. Educational aid], Bishkek, KRSU, 2006, 374 p.

7. Chu Kim Khung *Metod rascheta pokazateley effektivnosti funktsionirovaniya i nadezhnosti reztsov dlya bureniya shpurov* [Method of calculating indicators of efficiency of functioning and reliability of cutters for drilling blast-holes], Candidate's thesis, 05.05.06. YuRGPU(NPI), Novocherkassk, 2016, 155 p.

8. Sysoev N.I., Chu Kim Hung. Numerical modeling of the process of drilling a short hole in rocks with the use of an elastic-plastic model. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 3, pp. 142 — 152. [In Russ].

9. Sysoev N.I., Chu Kim Hung. Application of the finite element method for determining the design parameters of drilling cutters. *University News. North-Caucasian region. Technical sciences*. 2015, no. 4, pp. 73 — 80. [In Russ].

10. Sysoev N.I., Burenkov N.N., Chu Kim Hung. Justification of the structure and the choice of rational design parameters of a drilling cutter reinforced with diamond-hard-alloy plates. *University News. North-Caucasian region. Technical sciences*. 2016, no. 2, pp. 77 — 83. [In Russ].

11. Grinko A.A., Sysoev N.I., Grinko D.A. Improving shearing efficiency of percussion rotary drill bits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 102–115. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-102-115.

12. Pryhorovska T. O., Chaplinskiy S. S., Kudriavtsev I. O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits. *Petroleum exploration and development*. 2015, vol. 42, no. 6, pp. 888 — 892.

13. Guohui Lia, Wenjin Wanga, Zhijuan Jinga, Leibin Zuoa, Fubin Wangb, Zhen Weia Mechanism and numerical analysis of cutting rock and soil by TBM cutting tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 81, pp. 428–437.

14. Nina Yari, Marcin Kapitaniak, Vahid Vaziri, Lifeng Ma, Marian Wiercigroch Calibrated FEM modelling of rock cutting with PDC cutter. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 148, article 16006.

15. Helmons R. L. J., Miedema S. A., van Rhee C. Modeling the effect of water depth on rock cutting processes with the use of discrete element method. *Terra et Aqua*. 2016, vol. 142, no. 17.

16. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K. F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016, vol. 119, pp. 224 — 236.

17. Cheng Z., Sheng M., Li G. Cracks imaging in linear cutting tests with a PDC cutter: Characteristics and development sequence of cracks in the rock. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, vol. 179, no. 6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сысоев Николай Иванович[1] — д-р техн. наук, профессор,
e-mail: sysoevngmo@gmail.com,
Гринько Антон Александрович[1] — аспирант,
e-mail: nextdingo@mail.ru,
Гринько Дмитрий Александрович[1] — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: dingo17@mail.ru,
[1] Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова.
Для контактов: Гринько А.А., e-mail: nextdingo@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.I. Sysoev[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: sysoevngmo@gmail.com,

A.A. Grinko[1], Graduate Student, e-mail: nextdingo@mail.ru,
D.A. Grinko[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: dingo17@mail.ru,
[1] M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
346428, Novocherkassk, Russia.
Corresponding author: A.A. Grinko, e-mail: nextdingo@mail.ru.

Получена редакцией 23.11.2020; получена после рецензии 09.03.2021; принята к печати 10.05.2021.
Received by the editors 23.11.2020; received after the review 09.03.2021; accepted for printing 10.05.2021.

Приложение

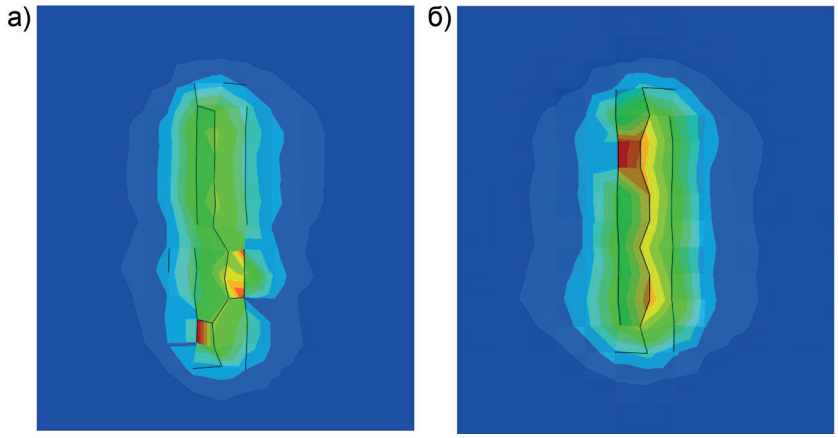

Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние породы при внедрении клина симметричной (а) и асимметричной формы (б) по осевой траектории

Fig. 2. Stress–strain behavior of rocks in penetration of wedge of symmetrical (a) and asymmetrical (b) shapes along axial trajectory

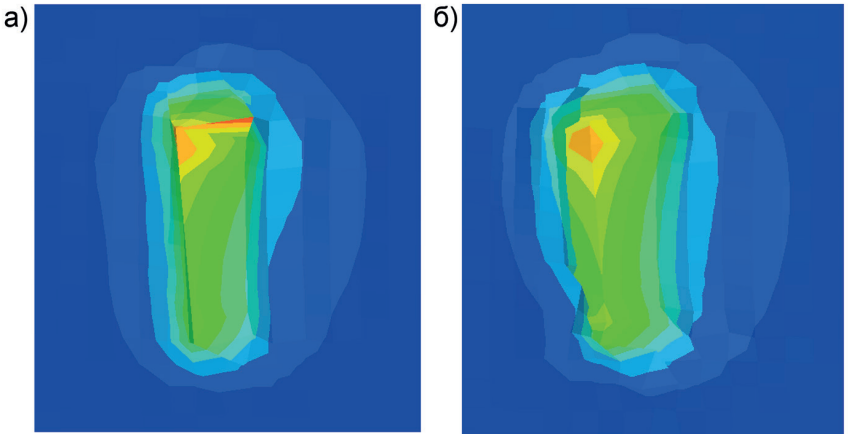

Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние породы при внедрении клина симметричной (а) и асимметричной формы (б) по винтовой траектории

Fig. 4. Stress–strain analysis of rocks in penetration of wedge of symmetrical (a) and asymmetrical (b) shape along spiral trajectory

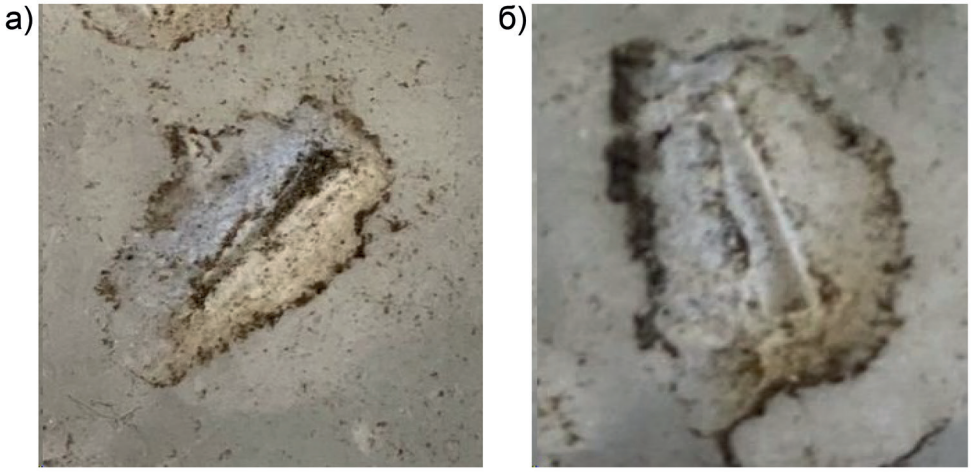

Рис. 7. Виды лунок (в плане) при осевой траектории внедрения клиньев симметричной (а) и асимметричной (б) формы

Fig. 7. Plan views of indents in penetration of symmetrical (a) and asymmetrical (b) wedges along axial trajectory

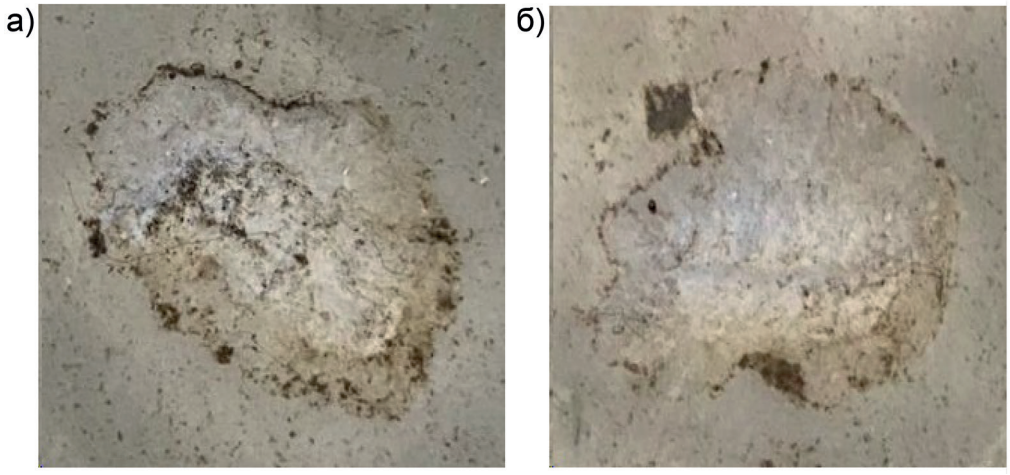

Рис. 8. Виды лунок (в плане) при винтовой траектории внедрения клиньев симметричной (а) и асимметричной (б) формы

Fig. 8. Plan views of indents in penetration of symmetrical (a) and asymmetrical (b) wedges along spiral trajectory