



Численное моделирование процесса резания угля резцовым инструментом горных машин при различных углах резания

Д.А. Задков¹, С.А. Чупин¹✉, А.Ф. Прялукхин¹, С.Е. Речкин¹, М.В. Садовский²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ООО «Гринс Майнинг», г. Новокузнецк, Российская Федерация

✉ chupin_sa@pers.spmi.ru

Резюме: В статье представлены результаты численного моделирования разрушения угля тангенциальным поворотным резцом в программном комплексе LS-DYNA. Цель исследования – оценка влияния угла установки резца на силовые параметры процесса резания. Разрушаемый массив моделировался в виде угольного блока, а резец рассматривался как абсолютно жесткое тело. Движение инструмента задавалось с постоянной скоростью. Угол установки резца изменялся в диапазоне от 45 до 53° с шагом 2°. Для описания механического поведения угля использовалась модель Holmquist–Johnson–Cook с учетом накопления повреждений и удаления разрушенных элементов. Сравнение расчетных вариантов выполнялось по средней и максимальной силе резания, средней и максимальной нормальной силе, а также по характеру формирования зоны разрушения. Установлено, что зависимость силовых параметров от угла установки имеет не-монотонный характер. Минимальные значения средней силы резания, средней нормальной силы и максимальной силы резания получены при угле 51°. При данном угле средняя сила резания составила 1,04 кН, средняя нормальная сила – 0,27 кН, а максимальная сила резания – 2,74 кН. Показано, что наиболее рациональным является сколово-сдвиговой режим разрушения, при котором зона повреждения развивается от вершины резца к свободной поверхности угольного блока. Полученные результаты могут быть использованы при выборе параметров установки резцов на шнеках очистных комбайнов.

Ключевые слова: уголь, разрушение угля, тангенциальный поворотный резец, сила резания, нормальная сила, угол резания, угол установки резца, разрушаемый массив, очистной комбайн

Для цитирования: Задков Д.А., Чупин С.А., Прялукхин А.Ф., Речкин С.Е., Садовский М.В. Численное моделирование процесса резания угля резцовым инструментом горных машин при различных углах резания. *Горная промышленность*. 2026;(4S):172–179. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-172-179>

A numerical simulation of the coal cutting process using a conical pick at different cutting angles

D.A. Zadkov¹, S.A. Chupin¹✉, A.F. Pryalukhin¹, S.E. Rechkin¹, M.V. Sadovsky²

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Greens Mining LLC, Novokuznetsk, Russian Federation

✉ chupin_sa@pers.spmi.ru

Abstract: This paper presents the results of a numerical simulation of coal cutting with a tangential rotary pick using the LS-DYNA software suite. The aim of the study was to evaluate the impact of the pick installation angle on the force parameters of the cutting process. The rock mass was represented by a deformable coal block, while the cutting tool was modeled as a rigid body. The installation angle varied from 45° to 53° with a step of 2°. The mechanical behavior and failure of coal were described using the Holmquist–Johnson–Cook material model with account of the accumulated damage and removal of the failed elements. The calculation cases were compared using the mean and peak cutting forces, the mean and peak normal forces, and the failure pattern in the cutting zone. It was found that the dependence of the force parameters on the installation angle is nonmonotone. The minimum values of the mean cutting force, mean normal force, and peak cutting force were obtained at the installation



angle of 51° . At this angle, the mean cutting force was 1.04 kN, the mean normal force was 0.27 kN, and the peak cutting force was 2.74 kN. The results indicate that the most efficient cutting mode is the chip-and-shear mode, in which the failure zone propagates from the pick tip toward the free surface of the coal block. The obtained results can be used to select rational pick installation parameters for the shearer drums of continuous miners.

Keywords: coal, coal cutting, tangential pick, cutting force, normal force, cutting angle, pick installation angle, rock mass to be cut, continuous miner

For citation: Zadkov D.A., Chupin S.A., Pryalukhin A.F., Rechkin S.E., Sadovsky M.V. A numerical simulation of the coal cutting process using a conical pick at different cutting angles. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):172–179. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-172-179>

Введение

В настоящее время при подземной добыче угля в длинных очистных забоях основным оборудованием механизированных комплексов являются очистные узкозахватные комбайны [1; 2], которые оснащаются преимущественно шнековыми исполнительными органами с тангенциальными поворотными резцами. Одной из ключевых задач является повышение эффективности работы этих машин, что подразумевает как увеличение их производительности, так и сокращение затрат и времени на простои техники, что осуществляется путем подбора рациональных параметров исполнительных органов и оптимизации режимов их работы. Одним из факторов, влияющих на производительность очистных комбайнов, является уровень надежности исполнительных органов [3], который, в свою очередь, зависит от принятой схемы расстановки резцов. Выбор геометрических параметров исполнительного органа непосредственно связан с определением нагрузок на резцах, а также на самом исполнительном органе, которые возникают в процессе внедрения резцового инструмента в разрушаемый массив. Здесь выделяются два подхода [4]: отечественный и западный, к первому эмпирическому относится ОСТ 12.44.258–84, ко второму – теоретические основы, предложенные Эвансом [5]. Модель Эванса получила широкое развитие, которое происходило посредством ее адаптации к другим видам горных пород, расширения анализируемых параметров в предложенном расчетном методе. Отечественные модели основываются на результатах экспериментальных исследований. Главной их отличительной особенностью является анализ нагрузок, возникающих на резцах. Однако их эмпирическая природа, а также заложенный в них ряд допущений создают неопределенность при выборе некоторых параметров, в связи с чем были попытки уточнения методики путем введения в расчетные формулы дополнительных, ранее не учтенных параметров [6–8].

Основным инструментом для разрушения горных пород методом резания в настоящее время являются конические тангенциальные резцы. Взаимодействие конических резцов с горной породой приводит к формированию зоны со сложным напряженно-деформированным состоянием. В ней одновременно протекают процессы локального смятия, сдвига, трещинообразования и последующего отделения фрагмента и выноса материала из зоны контакта [9; 10]. Характер протекания процесса разрушения влияет на множество технологических параметров: кусковатость породы, степень пылеобразования, энергоэффективность разрушения и др. Эффективность разрушения резцами

определяется не только прочностными характеристиками массива, глубиной резания, скоростью резания, но и геометрическими параметрами взаимодействия инструмента и массива. Не только форма и размеры самого инструмента [11; 12] влияют на усилия, затрачиваемые на отделение породы от массива, но и угол их установки на исполнительном органе оказывает существенное влияние [13–15]. Изменение угла установки может приводить к смене механизма разрушения массива, так, при одних углах разрушение происходит за счет сдвига с образованием крупных сколов, при других – смятием материала перед резцом. Все это отражается на силовых характеристиках и удельной работе разрушения. Силовые характеристики напрямую связаны с требуемой мощностью привода, нагрузками на резце и резцедержателе, вибрациями и износом инструмента и др. показателями [16].

Экспериментальные исследования влияния угла установки конического резца на усилия резания являются сложной задачей, так как требуют специализированных стендов, способных регистрировать силовые показатели резания породы. Обычно при лабораторном исследовании применяются стенды линейного резания, позволяющие варьировать параметры резания и геометрию инструмента с большой точностью. Лабораторные исследования не дают четкой картины распространения трещин и напряжений. В связи с этим численное моделирование рассматривается как эффективный инструмент исследования процесса резания. Численные модели позволяют варьировать параметры резания (скорость, глубину, угол, геометрию инструмента) с наименьшими временными и стоимостными показателями. В практике моделирования процесса разрушения горных пород резцовым инструментом наибольшее распространение получили методы дискретных (МДЭ) и конечных элементов (МКЭ) и их комбинации. [17]. Дискретные методы применяются для наглядного описания зарождения и распространения трещин, а конечно-элементные методы – для расчета контактных напряжений, силовых характеристик и деформационных упрочнений. В настоящее время для анализа высоконелинейных динамических задач разрушения используются различные коммерческие продукты Ansys Autodyn, Ansys Explicit, ABAQUS Explicit, LS-DYNA. В данных программных комплексах реализованы различные модели материалов, применимых для разрушения горных пород и искусственных композитов: Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) [18; 19], Holmquist-Johnson-Cook (HJC) [20; 21], Johnson-Holmquist II (JH-2) [22; 23], Drucker-Prager [24; 25], Karagozian & Case Concrete model (KCC) [26], Damage material model [27]

и др. В данной работе для анализа использовался LS-DYNA с моделью материала HJC. HJC разрабатывалась для хрупких и квазихрупких материалов и способна учитывать влияние на прочность материала давления, скорости и деформации [28; 29]. Однако ввиду большого количества параметров материала требуется их корректное задание на основе механических испытаний [30].

Основным параметром резания, определяющим основную долю мощности привода исполнительного органа, является сила резания [31–33]. Однако при проектировании конструкций исполнительных органов рассматривают нормальную силу, определяющую прижатие резца к массиву. Нормальная сила влияет на нагрузки на резцедержатель, шнеке и трансмиссии. Актуальность работы обусловлена необходимостью выбора при проектировании шнеков исполнительных органов очистных комбайнов рациональных значений углов резания, обеспечивающих сниженные показатели силы резания и нормальной силы. Снижение сил может привести к уменьшению энергоемкости процесса, снижению износа инструмента и повышению ресурса элементов трансмиссии.

Материалы и методы

В качестве разрушаемого массива применялся угольный блок в виде деформируемого разрушаемого тела. Разрушающий инструмент – абсолютно жесткое тело. Инструмент двигался линейно с постоянной скоростью 5 м/с. Глубина резания – 30 мм (рис. 1). Угол резания α изменяли в диапазоне 45–53° с шагом в 2° (45, 47, 49, 51, 53°). Статический коэффициент трения между резцом и породой составлял 0,6.

Геометрическая модель. Трехмерная модель разрушаемого угля (горной породы) и инструмента была создана в программе КОМПАС-3D и экспортирована в LS-DYNA. В качестве разрушающего инструмента использовался резец РШ-38-95L (рис. 2). Резец моделировался как абсолютно жесткое тело [34–36], так как жесткость материала резца значительно превышает жесткость угольного массива, и основная цель работы определить усилия резания, а не поведение резца. Так как в процессе разрушения угля (породы) резцом только часть инструмента взаимодействует с разрушаемым массивом, то трехмерная модель инструмента была ограничена державкой резца. Размеры модели разрушаемого массива угольного блока составляли 200×150×150 мм.

Численная модель. Разрушаемый массив задавался в виде трехмерных 8 узловых гексаэдров, с размером 4×4×4 мм типа Solid. Общее количество элементов 98 154; общее количество узлов 104 832. Для сокращения времени расчета резец задавался в виде оболочного 4-узлового элемента с размером 3×3 мм типа Shell. Общее количество элементов 1689; общее количество узлов 1670. Общая конечно-элементная модель приведена на рис. 3. В качестве модели материала угля и горной породы была использована карта *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (HJC). Для моделирования удаления материала в горном массиве должна быть применена карта *MAT_ADD_EROSION. Материал резца задавался с помощью карты *MAT_RIGID, со значениями плотности $R_0 = 7\,850$ кг/м³; модуль Юнга $E = 200\,000$ ГПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Граничные условия. Нижняя поверхность угольного блока была закреплена по всем степеням свободы. Верхняя и боковые поверхности оставались свободными. Движение резца задавалось линейно с постоянной скоростью в направлении резания с помощью карты *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID. Для исключения неустойчивого начального контакта движение резца задавалось с плавным выходом на расчетную скорость. Угол установки резца менялся путем поворота его геометрической модели относительно угольного массива при сохранении постоянной глубины резания и скорости резания. Контакт между инструментом и горной породой задавался картой *CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE. Силы, действующие на резец, определялись по результирующим контактным реакциям между поверхностью резца и угольным массивом. Тангенциальная составляющая контактной силы рассматривалась как сила резания F_c . Временные зависимости сил характеризовались пилообразными колебаниями, обусловленными нестационарным характером разрушения угля [37; 38]. Для количественного сравнения расчетных вариантов использовались средние и максимальные значения сил на установившемся участке резания. Начальный участок врезания резца в массив исключался из обработки ввиду переходных процессов. Корректность расчёта контролировалась по энергетическим параметрам модели. Анализировалась кинетическая, внутренняя, контактная и искусственная энергия.

Модель материала угля. Модель материала Johnson-Holmquist Concrete (HJC) была выбрана для угля, т.к. подходит для разных горных пород, бетонов и т. д. Первона-

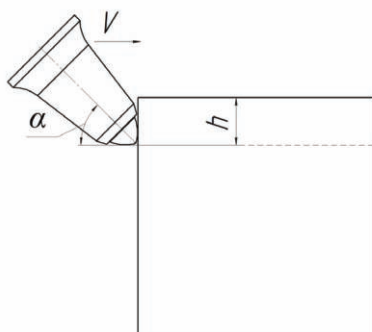


Рис. 1
Схема разрушения
угля

Fig. 1
A schematic
drawing
of coal cutting

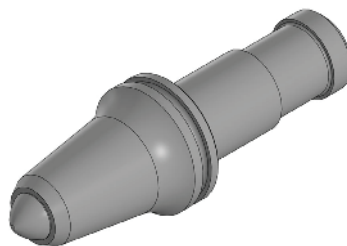


Рис. 2
Трехмерная модель
резца
РШ-38-95L

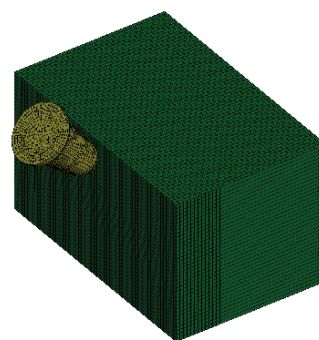


Рис. 3
Общая конечно-
элементная модель

Fig. 3
A general finite
element model

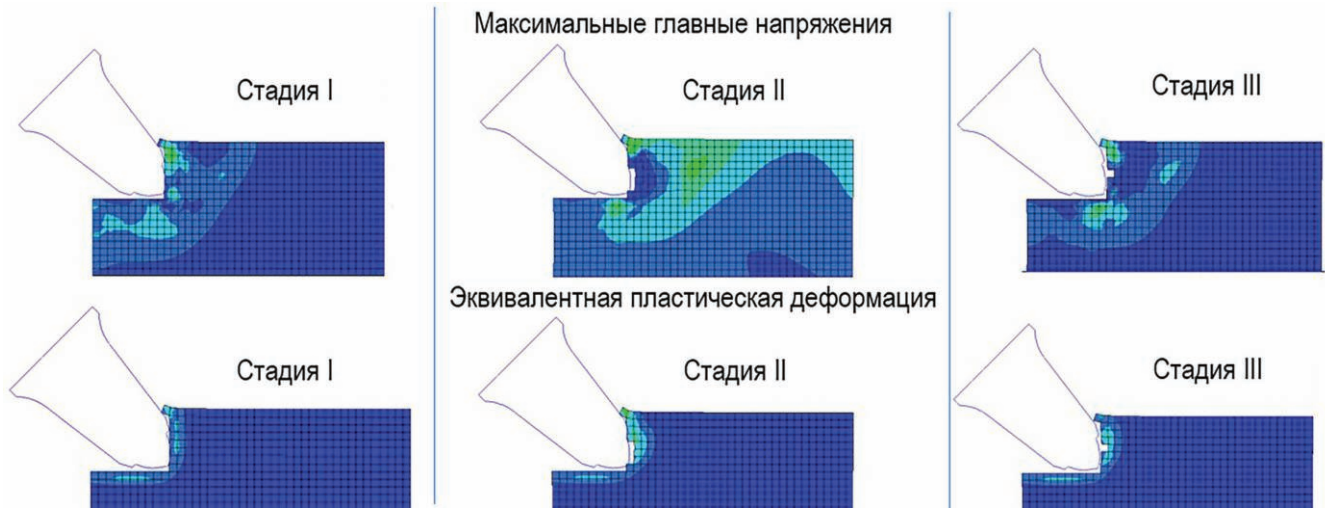


Рис. 4
Взаимодействие резца и массива угля

Fig. 4.
Interaction between the pick and the coal mass

чально модель НЭС была разработана для воспроизведения поведения бетона, подвергающегося большим деформациям, высокому давлению и высокой скорости деформации [39]. Бетон и уголь (горная порода) – квазихрупкие материалы с похожими механизмами разрушения, но есть два основных отличия. Во-первых, уголь (горная порода) создается с помощью естественных процессов, а образцы получают из фрагмента/массы горной породы на месте с помощью механической резки. Напротив, бетон представляет собой материал, созданный в лабораторных условиях из нескольких компонентов (воды, заполнителя и цемента). Во-вторых, у угля (породы) есть плоскости напластования, которые влияют на анизотропию ее механических свойств, и эти плоскости не включены во многие общие конститутивные модели для хрупких материалов. Ключевые параметры угольного массива задавались согласно исследованию [40].

Критерии сравнения результатов. Сравнение вариантов установки резцов выполнялось по значениям силы резания F_c и нормальной силы F_n . Поскольку процесс разрушения горных пород является нестационарным и сопровождается периодическим образованием сколов, временные зависимости сил имеют выраженный колебательный характер. В связи с этим для сравнения вариантов использовались средние значения сил на установившемся участке резания $\bar{F}_c$, $\bar{F}_n$ и максимальные (пиковые) значения $F_{c,max}$, $F_{n,max}$. Дополнительно рассчитывались $\bar{F}_n/\bar{F}_c$, характеризующее изменение направления результирующей нагрузки на резец, а также $F_{c,max}/\bar{F}_c$, $F_{n,max}/\bar{F}_n$ для определения соотношения максимальных и средних сил.

Результаты и их обсуждение

Анализ картины разрушения угольного блока выполнялся по результатам конечно-элементного моделирования в LS-DYNA. Основное внимание уделялось формированию области локального смятия перед резцом и развитию трещин. Такой анализ позволяет связать изменение силовых характеристик с физическим механизмом разрушения угля. В рамках используемой конечно-элементной постановки трещины не моделировались как самостоятельные геометрические разрывы. Их развитие оценивалось косвенно по распределению эквивалентной

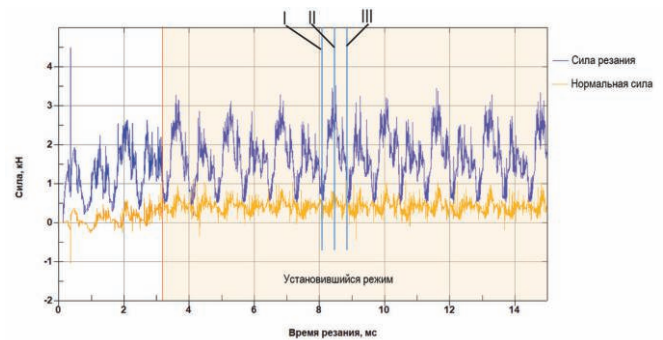


Рис. 5
Силовая характеристика разрушения угля, угол установки резца 45°

Fig. 5
Power characteristic of coal cutting with the pick installation angle of 45°

пластической деформации и полям главных напряжений. На начальной стадии формирования нового скола разрушения накапливаются непосредственно в зоне контакта резца с массивом. В этой области возникают высокие контактные напряжения, приводящие к локальному смятию материала и накоплению повреждений (рис. 4, стадия I). По мере дальнейшего перемещения резца зона повреждения увеличивается и распространяется перед режущей частью. При достижении критического уровня повреждения в зоне перед резцом формируются локализованные области разрушения с повышенными значениями сжимающих напряжений, при этом растягивающие напряжения ориентированы в направлении свободной поверхности массива (рис. 4, стадия II). Соединение поврежденной зоны с верхней свободной поверхностью рассматривается как признак скола. В этот момент происходит отделение фрагмента от основного массива, что сопровождается снижением силы резания (рис. 4, стадия III). Диаграмма изменения силы резания (рис. 5) имеет типичный пилообразный вид, который характеризуется тремя стадиями: I стадия – зона накопления пластической деформации; II стадия – зона образования критического ядра уплотнения с повышенными сжимающими напряжениями, пред-



Таблица 1
Максимальные и средние значения силы резания
при разрушении угля

Table 1
Maximum and average values of the cutting force during coal
cutting

Угол резания, град	$\overline{F}_c$, кН	$\overline{F}_n$, кН	$F_{c,max}$, кН	$F_{n,max}$, кН	$\overline{F}_n/\overline{F}_c$	$F_{c,max}/\overline{F}_c$	$F_{n,max}/\overline{F}_n$
45	1,53	0,34	2,96	1,14	0,22	1,93	3,35
47	1,56	0,33	3,25	1,6	0,21	2,08	4,85
49	1,56	0,33	3,91	0,8	0,21	2,51	2,42
51	1,04	0,27	2,74	0,97	0,26	2,63	3,59
53	1,05	0,35	3,03	1,36	0,33	2,89	3,89

шествующая крупному сколу; III – стадия зачистки перед формированием нового скола.

Наиболее эффективным способом разрушения горных пород является такой вариант, при котором зона повреждения формирует устойчивый скол при минимальной области локального смятия. В этом случае разрушение происходит преимущественно за счет образования и распространения трещин к свободной поверхности, а не за счет интенсивного дробления материала непосредственно перед резцом. На рис. 4 и 5 представлены картина разрушения и диаграмма сил резания и нормальной силы при установке резца под углом 45°. Аналогичные диаграммы и картины разрушения были получены и для остальных углов установки резца. Итоговые значения сил в зависимости от угла представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показал, что изменение угла установки резца оказывает сильное влияние на показатели сил. При углах 45, 47, 49° средняя сила резания $\overline{F}_c$ изменяется незначительно и составляет 1,53; 1,56; 1,56 кН соответственно. Дальнейшее увеличение угла до 51° приводит к резкому снижению средней силы резания до 1,04 кН. При дальнейшем увеличении угла до 53° средняя сила резания практически не изменяется и составляет 1,05 кН. Значение средней нормальной силы $\overline{F}_n$ также наблюдается минимальным при 51° и составляет 0,27 кН. При угле 53° нормальная сила возрастает до 0,35 кН при сохранении низкой средней силы резания. Это говорит о перераспределении контактной нагрузки и усилении нормального воздействия резца на угольный массив. Наибольшее значение максимальной силы резания $F_{c,max}$ наблюдается при угле 49° и составляет 3,91 кН, при этом минимальное значение максимальной силы наблюдается при 51°. Пиковое значение нормальной силы $F_{n,max}$ фиксируется при угле 53°. Стоит отметить, что минимальные пиковые значения нормальной силы наблюдаются при угле 49°.

Полученные результаты позволяют сделать выводы о наличии рационального диапазона углов установки резца. При углах 45–49° процесс резания сопровождается увеличением силы резания как средних значений, так и пиковых, при этом значение нормальных сил остается на неизменном уровне. По результатам моделирования наименее благоприятным углом является угол 49°. Значения пиковых сил могут являться эффектом интенсивного дробления и смятия перед резцом. Низкие же значения сил резания и нормальных сил при угле 51° могут означать изменение преобладающего механизма разрушения. Наиболее эффективным с энергетической точки зрения является сколово-сдвиговый режим резания. В этом слу-

чае разрушение массива происходит не столько за счет интенсивного смятия в зоне контакта, сколько за счет образования трещины, развивающейся от вершины резца в сторону свободной поверхности. Этот механизм требует меньших усилий резания и вызывает меньшие нормальные нагрузки на резец. Увеличение угла до 53° не приводит к дальнейшему снижению средней силы резания, но приводит к увеличению нормальных сил. Причиной роста нормальной силы является увеличение площади контакта державки резца с массивом породы. Фактически в разрушении массива может участвовать не только твердосплавная вставка резца, но и державка. Такой режим резания является менее предпочтительным, так как увеличивается нагрузка на резцедержатель и абразивный износ инструмента.

Выводы

1. Разработана численная модель разрушения угля тангенциальным поворотным резцом в LS-DYNA с использованием модели материала Holmquist-Johnson-Cook и выполнена серия расчетов при углах установки 45, 47, 49, 51, 53°.
2. Установлено, что угол установки резца существенно влияет на силовые параметры процесса резания. Зависимость изменения имеет немонотонный характер. При углах 45–49° средняя сила резания составляет 1,53–1,56 кН, а при увеличении угла до 51° средняя сила резания снижается на 33% до 1,04 кН.
3. Минимальные значения средней силы резания, средней нормальной силы и максимальной силы резания достигаются при угле установки 51°. Дальнейшее увеличение угла увеличивает нормальную силу. Максимальные пиковые нагрузки возникают в резце при угле 49°, что обусловлено эффектом интенсивного дробления и смятия перед резцом.
4. Установлено, что достижение рационального сколово-сдвигового режима работы, обеспечивающего минимальные значения сил сопротивления откалыванию угольного массива, возможно при угле установки 51°.
5. Полученные результаты могут быть использованы при выборе параметров установки резцов на шнеках очистных комбайнов. Однако для дальнейшего уточнения необходимо проведение дополнительных исследований по чувствительности системы к параметрам конечно-элементной сетки, трению, глубине резания и валидации численных и экспериментальных исследований.



Список литературы / References

1. Kazanin O., Sidorenko A., Sidorenko S., Ivanov V., Mischo H. High productive longwall mining of multiple gassy seams: best practice and recommendations. *Acta Montanistica Slovaca*. 2022;27(1):152–162. <https://doi.org/10.46544/AMS.v27i1.11>
2. Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia. *Acta Montanistica Slovaca*. 2020;26(1):60–69. <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.05>
3. Линник Ю.Н., Линник В.Ю., Воронова Э.Ю., Евстратов В.А., Цих А. Анализ структуры отказов шнеков очистных комбайнов. *Уголь*. 2021;(4):20–24. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-4-20-24>
Linnik Yu.N., Linnik V.Yu., Voronova E.Yu., Evstratov V.A., Zich A. Analysis of the structure of failures of augers of cleaning combines. *Ugol'*. 2021;(4):20–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-4-20-24>
4. Жабин А.Б., Поляков А.В., Аверин Е.А., Сарычев В.И. Состояние научных исследований в области разрушения горных пород резцовым инструментом на рубеже веков. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2018;(1):230–247.
Zhabin A.B., Polyakov A.V., Averin E.A., Sarychev V.I. State of scientific researches in the field of rock destruction by picks at the turn of the century. *Izvestiya Tulkogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2018;(1):230–247. (In Russ.)
5. Evans I. A theory of the cutting force for point-attack picks. *International Journal of Mining Engineering*. 1984;2(1):63–71. <https://doi.org/10.1007/BF00880858>
6. Bolobov V.I., Chupin S.A., Le-Thanh B. Influence of pick blunting on hydraulic breaker capacity in fracture of granite blocks. *Eurasian Mining*. 2023;(2):100–103. <https://doi.org/10.17580/em.2023.02.22>
7. Рахутин М.Г., Скворцов Р.Д. Резервы повышения эффективности оборудования для измельчения смерзшегося угля. *Уголь*. 2024;(6):82–86. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-6-82-86>
Rakhutin M.G., Skvortsov R.D. Potential to enhance the efficiency of equipment for frozen coal degradation. *Ugol'*. 2024;(6):82–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-6-82-86>
8. Khoreshok A., Ananiev K., Ermakov A., Kuziev D., Babarykin A. Determination of the rational number of cutters on the outer cutting drums of geokhod. *Acta Montanistica Slovaca*. 2020;25(1):70–80. <https://doi.org/10.46544/AMS.V25I1.7>
9. Cao R., Feng S., Xu F. Theoretical consideration of rock-cutting mechanisms and three-dimensional peak cutting force model of conical picks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025;58(8):9633–9648. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-04541-5>
10. Liu X., Tang P., Geng Q., Li X., Tian M. Numerical research on wear mechanisms of conical cutters based on rock stress state. *Engineering Failure Analysis*. 2019;97:274–287. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.045>
11. Li X. A study on the influence of pick geometry on rock cutting based on full-scale cutting test and simulation. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020;12(12):1687814020974499. <https://doi.org/10.1177/1687814020974499>
12. Samui P., Kumar R., Kurup P. Determination of optimum tool for efficient rock cutting. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2016;34(4):1257–1265. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0035-5>
13. Göktan R.M. Effect of cutter pick rake angle on the failure pattern of high-strength rocks. *Mining Science and Technology*. 1990;11(3):281–285. [https://doi.org/10.1016/0167-9031\(90\)90981-W](https://doi.org/10.1016/0167-9031(90)90981-W)
14. Wang Z., Zeng Q., Wan L., Lu Z., Wang H. Investigation of the influence of cutting parameters on conical pick cutting performance and rock damage. *Machines*. 2022;10(11):1034. <https://doi.org/10.3390/machines10111034>
15. Shao W. *A study of rock cutting with point attack picks* [PhD thesis]. Queensland, Australia: The University of Queensland, 2016. 185 p.
16. Park J.-Y., Kang H., Lee J.-W., Kim J.-H., Oh J.-Y., Cho J.-W. et al. A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;103:215–229. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.034>
17. Xu W., Huang Q., Zhang W., Zhang S., Ma Z., Gao K., Jiang N. Optimization of vane number for coal loading in shearer drums (1400 mm and 2240 mm) via discrete element modeling. *Applied Sciences*. 2025;15(21):11522. <https://doi.org/10.3390/app152111522>
18. Riedel W., Thoma K., Hiermaier S., Schmolinske E. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes. In: *Proceedings of 9th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg, 3–7 May 1999*. Vol. 315, pp. 315–322
19. Huo X., Shi X., Qiu X., Chen H., Zhou J., Zhang S., Rao D. Study on Rock damage mechanism for lateral blasting under high in situ stresses. *Applied Sciences*. 2021;11(11):4992. <https://doi.org/10.3390/app11114992>
20. Holmquist T.J., Johnson G.R., Cook W.H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics, Québec, 26–29 September 1993*. Vol. 2, pp. 591–600



21. Li D., Tong L., Huang Z., Xu X., Wang S., Mao J. et al. Numerical analysis on the drilling force of pneumatic impactors under different working conditions and structural parameters. *Scientific Reports*. 2025;15:33405. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18751-y>
22. Johnson G.R., Holmquist T.J. A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. In: Meyers M.A., Murr L.E., Staudhammer K.P. (eds) *Shock Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials*. New York: Marcel Dekker, Inc.; 1992. pp. 1075–1081.
23. Baranowski P., Kuciewicz M., Janiszewski J. JH-2 constitutive model of sandstone for dynamic problems. *Scientific Reports*. 2024;14:3339. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49668-z>
24. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1952;10(2):157–165. <https://doi.org/10.1090/qam/48291>
25. Liu S., Chen J., Liu X. Rock breaking by conical pick assisted with high pressure water jet. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014;6:868041. <https://doi.org/10.1155/2014/868041>
26. Malvar L.J., Crawford J.E., Wesevich J.W., Simons D. A plasticity concrete material model for DYNA3D. *International Journal of Impact Engineering*. 1997;19(9-10):847–873. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(97\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(97)00023-7)
27. Jaime M.C., Gamwo I.K., Lyons D.K., Lin J.S. Finite element modeling of rock cutting. In: *Proceedings of the 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, UT, 27–30 June 2010*. American Rock Mechanics Association; 2010. Paper ARMA-10-231
28. Шишлянников Д.И., Зверев В.Ю., Муравский А.К., Звонарев И.Е., Королев И.А. Методика определения средневзвешенной производительности механизированных комбайновых комплексов калийных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(7):125–133. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_7_0_125
Shishlyannikov D.I., Zverev V.Yu., Muravsky A.K., Zvonarev I.E., Korolyov I.A. Procedure to determine weighted average capacity of machine chains in potash mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(7):125–133. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_7_0_125
29. Mikhailov A.V., Korolyov I.A., Lopatiuk A.O. Corrosion stability of cutting tool's material for exploitation of peat deposits. *Procedia Engineering*. 2017;206:668–675. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.535>
30. Kuciewicz M., Baranowski P., Małachowski J. Dolomite fracture modeling using the Johnson-Holmquist concrete material model: Parameter determination and validation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021;13(2):335–350. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.09.007>
31. Gabov V.V., Zadkov D.A. Mathematical model of simple spalling formation during coal cutting with extracting machine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1015(5):052007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/5/052007>
32. Шемякин С.А., Шишкин Е.А. Определение касательной составляющей сопротивления резанию мерзлых осадочных пород по блокированной, глубокоблокированной и сотовой схемам. *Записки Горного института*. 2025;272:136–144. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16356> (дата обращения: 06.04.2026).
Shemyakin S.A., Shishkin E.A. Determination of the tangential component of cutting resistance during frozen sedimentary rock cutting using blocked, deeply blocked and cell cutting methods. *Journal of Mining Institute*. 2025;272:136–144. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16356> (accessed: 06.04.2026).
33. Maksarov V.V., Keksin A.I., Filipenko I.A. Improvement of magnetic-abrasive finishing of nonuniform products made of high-speed steel in digital conditions. *Key Engineering Materials*. 2020;836:71–77. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.836.71>
34. Шишкин Е.В., Казаков С.В. Энергоэффективные устройства для дезинтеграции особо прочных материалов. *Горный журнал*. 2021;(11):53–59. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.11.07>
Shishkin E.V., Kazakov S.V. Energy-efficient equipment for disintegration of extremely strong materials. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(11):53–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.11.07>
35. Максаров В.В., Нгуен В.Д., Халимоненко А.Д., Шишкин П.В. Технологическое обеспечение качества поверхности заготовки на основе локального криогенного воздействия при обработке аустенитных сталей. *Черные металлы*. 2024;(9):82–87. <https://doi.org/10.17580/chm.2024.09.13>
Maksarov V.V., Nguyen V.D., Khalimonenko A.D., Shishkin P.V. Technological support of workpiece surface quality based on local cryogenic impact during processing of austenitic steels. *Chernye Metally*. 2024;(9):82–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2024.09.13>
36. Keksin A.I., Filipenko I.A., Sorokopud N.I., Ovsiyannikov D.A. Effect of process parameters of magnetic abrasive finishing on productivity while ensuring surface quality of electrical engineering products. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2026;39(11):2815–2823. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.11b.13>



37. Михайлов А.В., Смирнов А.И. Анализ метода выемки торфяного сырья с откоса карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(2-1):197–209. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (дата обращения: 23.04.2026).
Mikhailov A.V., Smirnov A.I. Digging method analyzing organogenic materials mining by in-pit method. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(2-1):197–209. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (accessed: 23.04.2026).
38. Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Технологические требования к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):85–99. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_85
Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):85–99. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_85
39. Протосеня А.Г., Карасев М.А., Беляков Н.А., Тулин П.К. Прогноз предельного состояния и дилатансии пород вокруг горных выработок. *Записки Горного института*. 2025;276(2):107–122. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16542> (дата обращения: 23.04.2026).
Protosenya A.G., Karasev M.A., Belyakov N.A., Tulin P.K. Prediction of the limit state and dilatancy of rocks around mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2025;276(2):107–122. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16542> (accessed: 23.04.2026).
40. Xie B., Yan Z., Du Y., Zhao Z., Zhang X. Determination of Holmquist–Johnson–Cook constitutive parameters of coal: Laboratory study and numerical simulation. *Processes*. 2019;7(6):386. <https://doi.org/10.3390/pr7060386>

Информация об авторах

Задков Денис Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1709-431X>

Чупин Станислав Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладных компетенций в области цифровых технологий, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4103-9636>; e-mail: chupin_sa@pers.spmi.ru

Прялухин Алексей Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0008-7643-7918>

Речкин Семён Евгеньевич – студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Садовский Максим Викторович – ведущий инженер конструктор, ООО «Гринс Майнинг», г. Новокузнецк, Российская Федерация

Information about the authors

Denis A. Zadkov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1709-431X>

Stanislav A. Chupin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Applied Digital Technologies, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4103-9636>; e-mail: chupin_sa@pers.spmi.ru

Aleksey F. Pryalukhin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0008-7643-7918>

Semyon E. Rechkin – Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

Maxim V. Sadovsky – Leading Design Engineer, Greens Mining LLC, Novokuznetsk, Russian Federation

Article info

Received: 07.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 21.08.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 07.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 21.08.2026