

ВЛИЯНИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И БЕЗОПАСНОСТЬ ШАХТ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ГОРНОЙ МАССЫ ЗА СЧЕТ КОРРЕКТИРОВКИ УГЛОВ УСТАНОВКИ РЕЗЦОВ

канд. техн. наук В.А. ДРОНЧЕНКО, Д.Д. ЗАДОХИН
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения класса опасности по пылевому фактору в угольных шахтах. Одним из перспективных методов является управление размером фракции горной массы непосредственно в процессе ее добычи за счет оптимизации параметров режущего инструмента. В данной статье исследуется влияние углов установки резцов на гранулометрический состав продукта разрушения. В результате установлены оптимальные диапазоны значений углов, при которых выход наиболее пылевидной фракции снижается. Полученные данные позволяют обосновать выбор параметров исполнительного органа комбайна для минимизации пылеобразования и улучшения санитарно-гигиенических условий в очистном забое.

Ключевые слова: геоэкология, охрана окружающей среды, безопасность шахт, горнодобывающая промышленность, углы резцов, размер фракции, гранулометрический состав, оптимизация, проходческий комбайн.

Введение. По данным Статистического комитета Республики Беларусь¹, в стране в 2024 г. образовалось 55 340 тыс. т отходов производства, а использовано было лишь 17 827 тыс. т. Способы повышения уровня использования нефтесодержащих отходов предложены и проанализированы в [1–3]. Следует заметить, что подавляющая масса удаленных отходов – это отходы, образовавшиеся при добыче калийных солей.

Подземная добыча калийной соли в виде сильвинита представляет собой сложный технологический процесс, сопровождающийся постоянным образованием рудничной пыли. Пыль, являясь неизбежным спутником горного производства, создает серьезные проблемы для обеспечения безопасности труда и экологической защиты [4; 5]. Особую актуальность эта проблема приобретает при работе проходческих и очистных комбайнов, которые генерируют до 90–95% всего объема пылевых частиц в горных выработках.

Калийная пыль, обладающая выраженной гигроскопичностью, имеет сложное физико-химическое поведение в рудничной атмосфере. Содержание связанной влаги в сильвинитовых породах достигает 0,3–0,6%, что приводит к активному влагообмену с окружающей средой согласно закону Рауля. Это свойство существенно осложняет процессы пылеподавления и влияет на реологические характеристики аэрозоля, определяя особенности его распространения по горным выработкам.

Поведение пылевых частиц в подземном пространстве характеризуется сложной динамикой, где мелкие фракции менее 0,1 мкм демонстрируют броуновское движение, а более крупные частицы подчиняются законам аэродинамики. Адгезионные и аутогезионные свойства пыли дополнительно осложняют ситуацию, способствуя образованию устойчивых аэрозолей и налипанию частиц на поверхности оборудования.

Распределение запыленности по горным выработкам отличается значительной неоднородностью. Наибольшие концентрации наблюдаются в призабойных пространствах, зонах перегрузки горной массы и участках работы самоходного оборудования. Особую опасность представляет повышенная запыленность в околоствольных дворах, где скорость воздуха в воздухоподающих стволах достигает 5–8 м/с, создавая условия для интенсивного пылепереноса.

Пылевая обстановка в руднике формируется под влиянием множества факторов, где локальные источники в добычных участках определяют запыленность на рабочих местах, а распределенные источники вдоль транспортных коммуникаций формируют общий фон запыленности. Особую тревогу вызывает высокая концентрация пыли в зоне дыхания операторов горного оборудования, где показатели могут многократно превышать предельно допустимые значения.

Экологический аспект проблемы усугубляется выносом пылевых частиц исходящей струей рудника, что приводит к загрязнению прилегающих территорий и требует организации эффективных систем аспирации и очистки. В этой связи разработка комплексных решений по снижению пылеобразования на стадии разрушения горного массива приобретает первостепенное значение. Перспективным направлением представляется оптимизация параметров режущего инструмента горных машин, позволяющая управлять гранулометрическим составом продукта разрушения и минимизировать образование наиболее опасной мелкодисперсной фракции. Данное исследование направлено на всесторонний анализ природы и свойств

¹ Статистический ежегодник Республика Беларусь, 2025. – Минск: Нац. статист. ком. Респ. Беларусь, 2025 – URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 05.06.2026).

рудничной пыли, механизмов ее образования и распространения, а также разработку научно-обоснованных мероприятий по кардинальному улучшению аэрологи-ческой обстановки в подземных горных выработках.

Основная часть. Методология. Добыча соляных пород, включая каменную соль, сильвинит и карналлит, сопряжена с уникальными техническими вызовами, обусловленными их физико-механическими свойствами. Высокая сопротивляемость резанию, пластичность, гигроскопичность и абразивность требуют особого подхода к проектированию режущего инструмента горных комбайнов. Например, сопротивление резанию соляных пород Старобинского месторождения достигает 350–450 кН/м, что значительно превышает аналогичный показатель для углей Донецкого бассейна (80–160 кН/м). Это приводит к повышенной энергоемкости процессов разрушения и снижению производительности оборудования.

Оптимизация углов резцов исполнительного органа комбайна становится ключевым фактором минимизации рисков аварий и повышения эффективности добычи² [6–8].

Угол резца определяет характер взаимодействия инструмента с породой. Основные параметры:

- угол заострения – влияет на усилие резания. Увеличение угла снижает сопротивление, но повышает риск сколов;
- угол поворота (φ) – угол установки резца относительно направления вращения диска (рисунок 1);
- угол атаки (δ) – это угол между касательной к режущей кромке наконечника резца и его осью (рисунок 1).

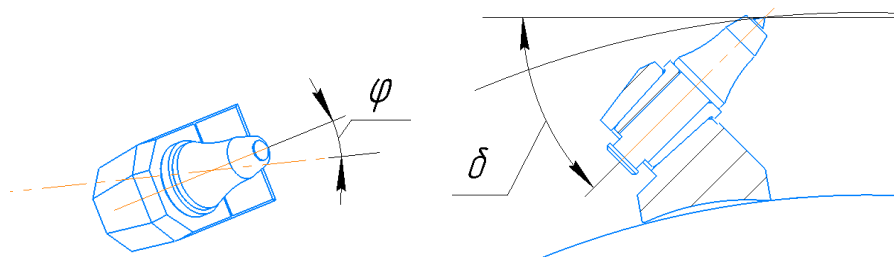


Рисунок 1. – Угол поворота φ и угол атаки δ

При оптимальном угле атаки достигается высокая эффективность выработки при низком потреблении энергии. Угол влияет на способность резца проникать в породу, что приводит к изменению мощности и энергопотребления. Кроме этого, во время работы резец подвергается изгибу в держателе и, следовательно, создает нагрузку.

На рисунке 2 видно, что при установке резца перпендикулярно к поверхности породы максимальная толщина стружки h такая же, как и максимальная глубина внедрения H резца в породу. Но при изменении угла атаки максимальная толщина стружки отличается от максимальной глубины внедрения H . В теории толщина стружки уменьшается, причем чем меньше угол, тем меньше толщина стружки. Однако на практике в связи с неподдающимся расчетам поведением разрушения забоя это, как правило, не учитывается.

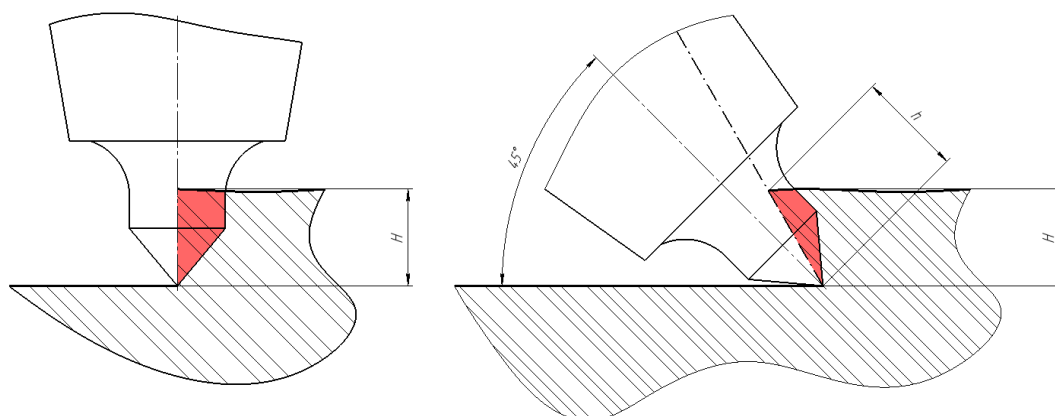


Рисунок 2. – Влияние угла атаки на глубину внедрения

² OPTIMIERUNG VON VORTRIEBSMASCHINEN // Kommission der Europäischen Gemeinschaften. – 1982. – № 3. – С. 14 – 19.

При оптимальном угле поворота резец вращается в процессе резки, что приводит к самозатачивающемуся эффекту и более благоприятному износу самого резца, а значит, увеличивает срок его службы. Неоптимальный угол поворота тормозит поворот, что может вызвать изнашивание с одной стороны. Это в некотором роде влияет на размер фракции, но не критично.

Прочностные характеристики и хрупкость соляных пород (значения параметров приведены на рисунке 3) оказывают определяющее влияние на выбор геометрии режущего инструмента для горных комбайнов. Пределы прочности при сжатии, растяжении и изгибе образуют характерные соотношения: для каменной соли – 1:0,13:0,04; для сильвинита – 1:0,07:0,01; для карналлита – 1:0,1:0,01. На Старобинском месторождении прочность на сжатие варьируется в значительных пределах – от 25,0 МПа во втором калийном горизонте до 40,0 МПа в подкровной каменной соли. Такие показатели диктуют необходимость применения резцов с повышенной износостойкостью, особенно при работе с загрязненными глинистыми примесями породами, где прочностные характеристики снижаются на 15–20%.

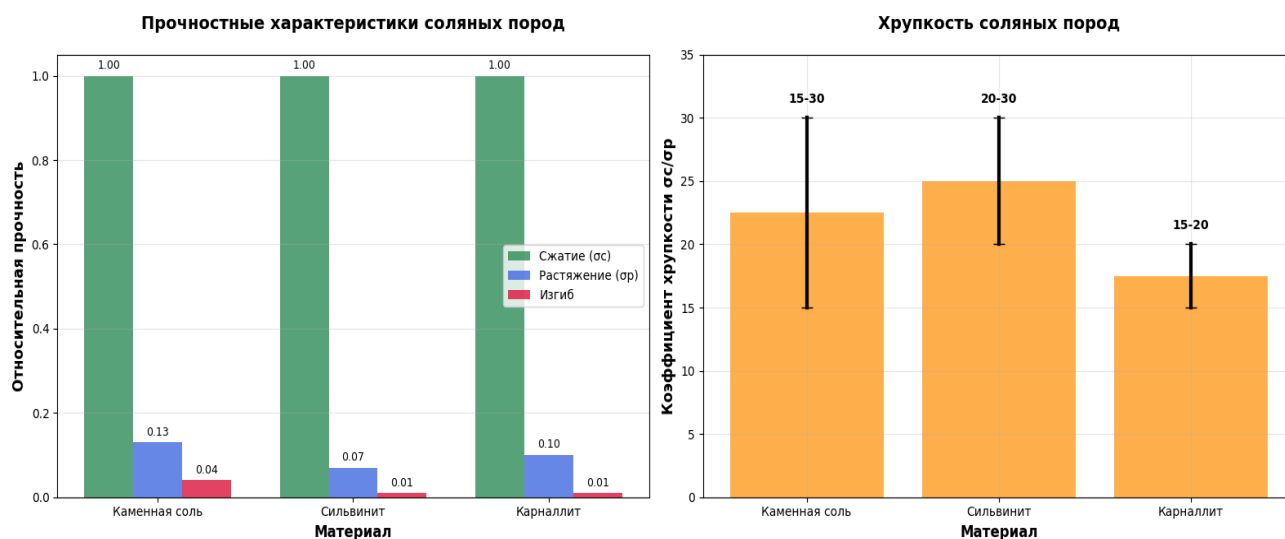


Рисунок 3. – Прочностные характеристики пород и их хрупкость

Упруго-деформационные свойства соляных пород, включая модуль упругости в диапазоне $E = (1,2–2,3) \cdot 10^4$ МПа и коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, непосредственно влияют на характер деформирования массива под нагрузкой режущего инструмента. Реологические особенности пород, проявляющиеся в явлениях ползучести, также играют существенную роль: относительная деформация достигает 0,8–2,5% для каменной соли, 2,3–3% для сильвинита и 2,5–5% для карналлита. Эти параметры требуют тщательного учета как при расчетах долговременной устойчивости забоев, так и при проектировании систем крепления горных выработок.

Важной особенностью соляных пород является их хрупкость, оцениваемая по соотношению прочностных характеристик σ_c/σ_p . Для каменной соли этот показатель составляет 15–30, для сильвинита – 20–30, для карналлита – 15–20. При динамических нагрузках, характерных для горных ударов, даже относительно пластичные породы демонстрируют хрупкое разрушение, что существенно повышает риск обрушений. Данное обстоятельство подчеркивает важность применения резцов с оптимизированными углами, способствующими снижению ударных нагрузок. Экспериментально установлено, что увеличение переднего угла резца с 25° до 35° позволяет уменьшить средний размер фракции на 40%, однако превышение оптимальных значений приводит к интенсивному износу инструмента. Для соляных пород рекомендуется использовать резцы с углом резания 50° и задним углом 10° , аналогичные применяемым в приборе ДКС-2 для измерения сопротивляемости. Ширина режущей части 20 мм и трансцевидная форма кромки обеспечивают стабильность процесса резания.

Гигроскопичность соляных пород, особенно выраженная у мелких фракций, приводит к образованию раскислов на поверхностях горного оборудования, что значительно ускоряет коррозионные процессы. Для защиты механизмов необходимы материалы с повышенной устойчивостью к агрессивным средам, а также регулярная очистка ответственных узлов. Абразивные свойства сильвинита (0,14–7,4 мкм) и калийной соли (6,5–30,5 мкм) вызывают интенсивное истирание режущих кромок, сокращая ресурс инструмента. Компенсация абразивного износа достигается применением композитных сплавов и систем автоматической регулировки углов в реальном времени. Практический опыт внедрения адаптивных систем на горных предприятиях показал увеличение межремонтного периода комбайнов на 25–30% при одновременном снижении затрат на замену резцов.

Сопротивляемость резанию, определяемая как $A = P_p/h$, где P_p – усилие резания, а h – толщина стружки, представляет собой интегральный показатель, непосредственно влияющий на энергопотребление процесса. Для соляных пород Старобинского месторождения этот параметр составляет 350–450 кН/м, что требует примене-

ния комбайнов с повышенной мощностью. Проведенные эксперименты с различными геометриями режущего инструмента показали, что оптимизация углов резцов позволяет снизить удельное энергопотребление на 15–20%. Установлено, что резцы с углом заострения 60–65°, разработанные для угольных пластов, демонстрируют высокую эффективность и при работе с силвинитом, обеспечивая получение однородной фракции 6–10 мм. Особое значение имеет квалификация операторов: машинисты, обученные выбирать рациональные схемы отработки забоя, существенно снижают вероятность заштыбовки и неравномерного износа инструмента.

Технологические свойства соляных пород, включая насыпную плотность 1,3–1,5 т/м³ и угол естественного откоса 39°, оказывают непосредственное влияние на проектирование систем транспортировки горной массы. Коэффициент трения соляной породы по стали, составляющий 0,4, требует использования конвейеров с усиленными приводными механизмами. Склонность горной массы к слеживанию при длительном хранении повышает риск закупорки оборудования, что делает критически важным своевременное удаление отработанного материала из забоя. Современные технические решения, включающие датчики контроля засорения и системы пневмоочистки, позволяют минимизировать простои технологического оборудования.

Ключевыми преимуществами оптимизации являются снижение энергопотребления на 15–20% за счет уменьшения сопротивления резанию, увеличение ресурса резцов на 20–25% благодаря снижению абразивного износа и рост производительности на 10–15% за счет стабилизации процесса дробления.

Подобное достигается комплексным подходом:

- мониторингом состояния резцов с использованием приборов типа ДКС-2. Регулярный контроль позволяет своевременно выявлять износ и корректировать углы, предотвращая перегрузки;
- автоматической регулировкой углов в зависимости от типа породы. Системы на основе датчиков давления и вибрации адаптируют геометрию резцов в реальном времени, минимизируя энергозатраты;
- применением износостойких материалов (карбид вольфрама, керамические покрытия) и антикоррозионных сплавов. Это особенно важно для работы с гигроскопичными соляными породами, где коррозия сокращает срок службы инструмента.

Результаты. Теоретические расчеты велись согласно ОСТ 12.44.258-84-1³. В расчете использовался планетарный исполнительный орган с тремя резцовыми дисками, на каждом из которых находилось 15 поворотных резцов РКС-1. Технические данные этого исполнительного органа – по технической документации комбайна «Урал-61». Данные о свойствах породы – по Старобинскому месторождению (данные «Беларуськалия»). Расчеты велись при углах атаки 30°, 35°, 40° и 45°. Угол поворота резца составлял 16° и не менялся. Угол заострения резца был взят из данных резца РКС-1. Скорость подачи – исходя из производительности.

В ходе расчетов было выявлено, что уменьшение угла атаки резцов влияет на энергоэффективность и толщину получаемой стружки. По данным расчетов составлена таблица 1.

Таблица 1. – Влияние углов атаки

Параметры	Угол атаки			
	30°	35°	40°	45°
Средняя толщина стружки $h_{ср}$, см	0,47	0,54	0,61	0,67
Средний размер фракции $d_{ср}$, см	1,44	1,5	1,56	1,61
Средняя мощность резания относительного вращения, кВт	48,55	68,56	86,7	101,17
Средняя мощность переносного вращения, кВт	9,27	11,45	13,4	14,93
Удельная энергоемкость, (кВт*ч)/т	0,32	0,44	0,56	0,64

На основании данных таблицы можно сделать следующие выводы:

1. Влияние угла атаки на толщину стружки и размер фракции.

С увеличением угла атаки от 30° до 45° наблюдается рост средней толщины стружки (с 0,47 до 0,67 см) и среднего размера фракции (с 1,44 до 1,61 см). Это указывает на то, что увеличение угла атаки способствует образованию более крупной стружки и фракций.

2. Влияние угла атаки на мощность резания.

Мощность, затрачиваемая на резание, существенно возрастает с увеличением угла атаки:

- мощность относительного вращения увеличивается с 48,55 кВт до 101,17 кВт;
- мощность переносного вращения также растет, но менее значительно: с 9,27 кВт до 14,93 кВт.

3. Влияние угла атаки на энергоемкость.

Удельная энергоемкость процесса увеличивается с 0,32 до 0,64 (кВт*ч)/т, т.е. почти в два раза. Это свидетельствует о том, что при больших углах атаки процесс резания становится менее энергоэффективным.

³ ОСТ 12.44.258-84-1. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. – М., 1984. – С. 3–98.

Общий вывод. Уменьшение угла атаки резцов в исследованном диапазоне (30° – 45°) положительно влияет на энергоэффективность процесса: снижаются удельная энергоёмкость и требуемая мощность резания. Однако при этом уменьшается толщина стружки и размер фракции, что может быть связано с более мелким дроблением материала. Таким образом, выбор оптимального угла атаки требует баланса между качеством дробления (размер фракции) и энергозатратами.

Помимо этого, в ходе расчетов с учетом старых экспериментальных данных испытаний комбайна «Урал-61» было получено теоретическое приблизительное соотношение размеров фракций (таблица 2).

Таблица 2. – Теоретическая массовая доля фракций

Граничные размеры фракции	Массовое содержание фракций, %			
	30°	35°	40°	45°
≥ 5	70,59	71,7	72,59	73,32
3...5	10,55	10,21	9,92	9,69
1...3	12,13	11,659	11,28	10,97
0,5...1	3,31	3,17	3,05	2,96
0,25...0,5	1,7	1,62	1,56	1,52
$\leq 0,25$	1,73	1,65	1,59	1,54

Согласно таблице 2 и рисунку 4, с увеличением угла атаки резцов с 30° до 45° массовая доля крупной фракции (≥ 5 см) возрастает с 70,59% до 73,32%, в то время как содержание всех более мелких фракций последовательно уменьшается. Это указывает на то, что большие углы атаки обеспечивают более грубое дробление материала с преобладанием крупных частиц. Вместе с тем, как показывают предыдущие данные, такой режим работы сопровождается повышенными энергозатратами. Таким образом, выбор оптимального угла атаки представляет собой компромисс между получением более крупной фракции продукта и энергоэффективностью процесса.

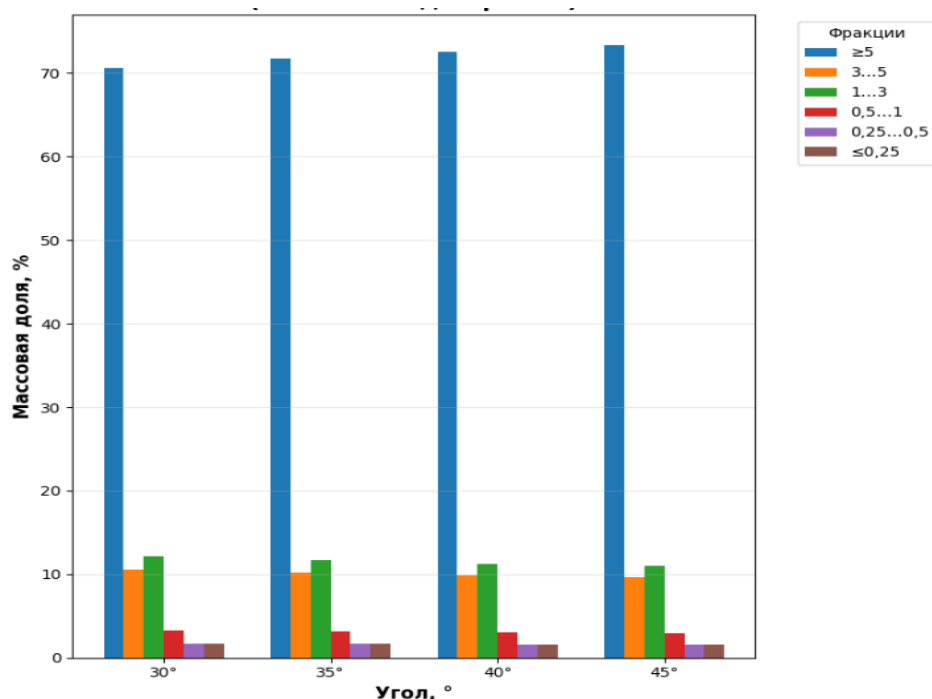


Рисунок 4. – Теоретическая массовая доля фракций

Безопасность производства и риски. В ходе изучения вопроса о влиянии углов было также выявлено, что затупленные резцы с неправильными углами увеличивают трение, и в газовых шахтах это может привести к взрыву. Система мониторинга в реальном времени (например, датчики температуры и вибрации) позволяет своевременно выявлять износ. Некорректные углы ускоряют износ в 1,5–2 раза. Например, при угле 45° на твердых породах ресурс резцов сокращается до 50 ч против 120 ч при 35° . Крупные обломки (более 15 мм) увеличивают нагрузку на дробилки и конвейеры, повышая риск поломок. Оптимизация углов резцов снижает долю некондиционной фракции до 5%.

Заключение. Безопасная и эффективная добыча соляных пород требует глубокого понимания их физико-механических свойств и адаптации режущего инструмента под конкретные условия.

На основании проведенного анализа можно сделать общий вывод о комплексном влиянии угла атаки резцов на процесс резания. С увеличением угла атаки от 30° до 45° четко прослеживается тенденция к укрупнению получаемого продукта: средняя толщина стружки возрастает на 43%, средний размер фракции увеличивается на 12%, а массовая доля наиболее крупной фракции (≥ 5 см) прогрессивно растет с 70,59% до 73,32%. Параллельно наблюдается сокращение всех более мелких фракций, что свидетельствует о более грубом дроблении материала при больших углах атаки.

Однако достижение такого качества продукта сопряжено со значительным ростом энергозатрат. Мощность резания возрастает более чем вдвое – с 48,55 до 101,17 кВт, а удельная энергоемкость процесса увеличивается на 100% – с 0,32 до 0,64 (кВт·ч)/т. Это указывает на существенное снижение энергоэффективности технологического процесса при использовании больших углов атаки.

Таким образом, при выборе оптимального режима работы необходимо находить компромисс между качественными характеристиками продукта и экономической эффективностью процесса. Уменьшение угла атаки обеспечивает существенную экономию энергоресурсов при некотором ухудшении гранулометрического состава продукта, в то время как увеличение угла атаки позволяет получить более крупную фракцию, но требует значительно больших энергозатрат. Оптимальное значение угла атаки должно определяться исходя из конкретных производственных требований к качеству продукта и допустимому уровню энергопотребления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.П., Дронченко В.А. Охрана труда рабочих и защита окружающей среды от вредного влияния нефтесодержащих отходов. – Новополоцк: ПГУ, 2016. – 248 с.
2. Утилизация нефтесодержащих сточных вод эмульгированием и сжиганием / В.П. Иванов, В.А. Дронченко, Т.В. Вигерина и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 1. – С. 27–33.
3. Иванов В.П., Лялякин В.П., Дронченко В.А. Защита окружающей среды от нефтесодержащих отходов с наличием дизельного топлива и мазута // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 1(49). – С. 122–127. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-49-1-122-127
4. Дронченко В.А., Задохин Д.Д. Повышение безопасности в шахтах за счет оптимизации углов резцов исполнительного органа комбайна // Инновационные технологии в машиностроении: электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. / Новополоцк (22–23 апр. 2025 г.) / Полоц. гос. ун-т; под ред. В.К. Шелега, Н.Н. Попок. – Новополоцк, 2025. – С. 70–71. – URL: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/47963/1/70-71.pdf> (дата обращения: 15.05.2026).
5. Прокопенко С.А., Шлапаков П.А. Повышение безопасности и эффективности отбойки горной массы в шахтах // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 2. – С. 27–31.
6. Литвинский Г.Г. Основы теории резания и разрушения горных пород // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2017. – № 8(51). – С. 5–15.
7. Пути развития теории разрушения углей и горных пород резцовым инструментом / А.Б. Жабин, А.В. Поляков, Е.А. Аверин и др. // Уголь. – 2019. – № 9(1122). – С. 24–28. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-9-24-28
8. Геллер Ю.А. Факторы, влияющие на процесс разрушения грунтового и горного массива // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т. 27. – № 5. – С. 17–25. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-5-17-25

Поступила 06.07.2026

ENVIRONMENTAL IMPACT AND MINE SAFETY DUE TO CHANGES IN THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF THE ROCK MAS BY ADJUSTING THE INSTALLATION ANGLES OF CUTTERS

V. DRONCHENKO, D. ZADOKHIN
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The relevance of the work is determined by the necessity to reduce the hazard class concerning the dust factor in coal mines. One of the promising methods is managing the fraction size of the mined rock directly during its extraction by optimizing the parameters of the cutting tool. This article investigates the influence of cutter installation angles on the granulometric composition of the destruction product. As a result, optimal ranges of angle values are established, under which the yield of the most finely dispersed dust fraction decreases. The obtained data allow substantiating the selection of parameters for the miner's actuating mechanism to minimize dust formation and improve sanitary and hygienic conditions in the longwall face.

Keywords: *geoecology, environmental protection, mine safety, mining industry, cutter angles, fraction size, granulometric composition, optimization, roadheader.*