

ГОРНЫЕ МАШИНЫ MINING MACHINES

Научная статья

УДК 622-1/-9, 622.023

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-94-104

Линник Юрий Николаевич, Линник Владимир Юрьевич*

Государственный университет управления

* для корреспонденции: d0c3n7@gmail.com

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И УГЛЕЙ: АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ



Информация о статье

Поступила:

19 декабря 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к печати:

15 июня 2026 г.

Ключевые слова:

хрупкое разрушение, резание, горная порода, уголь, метод оценки, твердость, прочность, химико-петрографические свойства, энергетические показатели, сопротивляемость резанию

Аннотация.

Одним из условий оптимального с точки зрения производительности и надежности угледобывающих машин является соответствие их параметров физико-механическим свойствам разрушаемых при добыче угольных пластов. Поэтому при решении задач, связанных с расчетом параметров и режимов работы угледобывающих машин, установления области их рационального применения, определением нагрузки на очистной забой и т. п. необходим показатель, интегрально учитывающий прочностные свойства угольных пластов. В этой связи на протяжении многих лет в различных странах, в том числе и в России, проводились теоретические и экспериментальные исследования по поиску методов и критериев оценки хрупкого разрушения различных материалов, включая горные породы и угли. Эти исследования объединили специалистов многих дисциплин: физики твердого тела; механики сплошных сред; материаловедения; конструирования и т. д. Отмечая несомненные заслуги предшественников в области хрупкого разрушения, стоит, однако, отметить, что полученные ими результаты и методы носят ограниченный характер и не могут в полной мере использоваться для оценки угольных пластов, как объектов, разрушаемых режущими исполнительными органами угледобывающих машин. Накопленные знания в области хрупкого разрушения позволили разработать аппаратуру, метод и критерии для оценки угольных пластов применительно к выбору оптимальных параметров угледобывающих машин. В статье рассмотрены основные методы оценки хрупкого разрушения, которые в разное время предлагались российскими и зарубежными учеными, приведшие в конечном счете к разработке общепризнанного показателя сопротивляемости угольных пластов резанию.

Для цитирования: Линник Ю.Н, Линник В.Ю. Оценка процесса разрушения горных пород и углей: анализ методов при различных способах приложения нагрузки // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 3 (185). С. 94-104. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-94-104, EDN: SEGPOB

Введение

Большая заслуга в создании теоретических основ хрупкого разрушения принадлежит Гриффитсу А., который впервые предложил объяснение явления хрупкого разрушения, основанное на понятии энергии, необходимой для развития трещины. Основные положения теории Гриффитса, описанные во многих публикациях, в том числе в [1, 2], сводятся к следующему. В исходном состоянии материал, подчиняющийся чисто упругим де-

формациям, содержит микротрещины. Трещина может распространяться только тогда, когда упругая энергия деформации, освобождаемая в процессе роста трещины, равна энергии, расходуемой на образование новых поверхностей, или превышает ее.

Теория Гриффитса применима только к абсолютно хрупким материалам, таким как, например, стекло. Для оценки хрупкого разрушения металлов Ирвин, Орован и Гилман заменили в формуле Гриффитса поверхностную энергию величиной

энергии пластической деформации. Теорией разрушения материала на основе имеющихся в материале трещин занимался также Баренблатт Г. И. [3], который рассмотрел возможность существования в нагруженном теле равновесных трещин. Им введено понятие молекулярных сил сцепления, которые описываются константой, характерной для данного материала. Применительно к изучению процесса разрушения углей и пород режущими инструментами это направление не получило широкого применения.

Существуют и другие модели разрушения хрупких тел. Так, все более широкое применение для описания процесса разрушения находят положения теории дислокаций [4]. Согласно ей трещина рассматривается как кривая дислокация. Трещина заменяется эквивалентным распределением дислокаций, что позволяет рассчитывать поля элементарных напряжений и перемещений в окрестности трещины.

Для описания процесса разрушения также используется и кинетическая теория прочности [5], основным посылом которой является то обстоятельство, что внешняя сила не осуществляет разрыва межатомных связей, а лишь создает условия для их разрыва тепловыми флуктуациями. При кинетическом подходе к проблеме прочности разрушение рассматривается как процесс накопления каких-либо нарушений, характеризующийся временем, за которое процесс развивается и приводит к разрыву. В соответствии с этим подходом основной характеристикой прочностных свойств материала является величина долговечности под нагрузкой (τ). Для описания процесса разрушения материала с точки зрения кинетического подхода используется зависимость долговечности образцов из этого материала от приложенного напряжения (σ) и температуры испытаний (T). На возможность применения такого подхода к процессу резания угля указано в работе [6]. Однако необходимо отметить, что все опыты по разрушению твердых тел с различными типами межатомных связей и структур, обосновывающие кинетический подход, проводились в условиях одноосного растяжения, а не сложного напряженного состояния, которое имеет место в процессе разрушения угля резанием.

Рядом авторов (Вейбулл В., Конторова Т. А., Фрейденталь А. М.) предложены модели разрушения твердых тел на основе статистических теорий. Основным положением при данном подходе является то, что распределение дефектов структуры реальных твердых тел связано с их прочностью. Разрушение тела происходит при этом из-за развития наиболее опасного дефекта (слабого звена). Иначе говоря, прочность твердых тел зависит от их объемов, которые определяют вероятность встречи опасных дефектов. При этом прочность тела повышается с уменьшением его размеров. Практическое использование статистического подхода при оценке хрупкой прочности материалов затруднительно из-за очень большого разброса результатов испытаний. Так, в работе [7] Фрейденталь А. М. высказывает сомнение в том, будет ли полезен прогноз,

основанный даже на хорошо установленных функциях распределения дефектов, так как безопасные значения нагрузок могут оказаться такими низкими, что практически это будет означать невозможность использования хрупких материалов.

Таким образом, проведенный анализ хрупкого разрушения показывает, что до сих пор нет единого феноменологического подхода к проблеме хрупкого разрушения. Применение же какого-либо из рассмотренных подходов в инженерных задачах разрушения углей выемочными машинами является затруднительным по следующим основным причинам:

1. Целью всех описанных выше работ являлось исследование природы неожиданного хрупкого разрушения, связанного с внезапным катастрофическим выходом из строя составных частей конструкций, т. е. исследовались в основном причины развития магистральных трещин, приводящих к лавинному разрушению.

Целью разрушения углей при добыче выемочными машинами является не просто отделение угля от массива, а измельчение, т. е. разделение угля на различные классы крупности. Иначе говоря, при добычании углей механическим способом степень их измельчения существенно превышает степень разрушения, необходимую для приведения отделенного от массива угля в транспортабельное состояние. Поэтому в данном случае могут представлять интерес закономерности процесса ветвления трещин, которые определяют в конечном счете соотношение классов крупности в разрушенном материале. Однако закономерности процесса развития и взаимодействия не одной, а многих трещин исследованы очень мало, так как это связано со значительными сложностями как теоретического, так и экспериментального характеров.

2. Все вопросы хрупкого разрушения рассматриваются в основном в условиях одноосного напряженного состояния. Как уже отмечалось, процесс разрушения угля инструментами выемочных машин происходит в условиях сложного напряженного состояния угольного массива, которое оказывает существенное влияние на протекание процесса разрушения.

3. Вопросы хрупкого разрушения широко исследованы, как правило, для однородных, изотропных тел, тогда как уголь отличается значительной неоднородностью строения и анизотропией.

Учитывая указанные особенности процесса разрушения угля резанием, при его изучении основным принципом являлось сочетание экспериментальных и аналитических методов исследования. Кроме того, в связи с неоднородностью строения угля при анализе экспериментов широко использовались методы теории вероятностей и математической статистики.

Результаты исследований

Вопросам физического толкования процесса резания угля и горных пород посвящено значительное количество работ, как российских [8–11], так и зарубежных [12–15]. Наиболее распространенные представления о процессе разрушения угля режу-

щими инструментами сводятся к следующему [16–18].

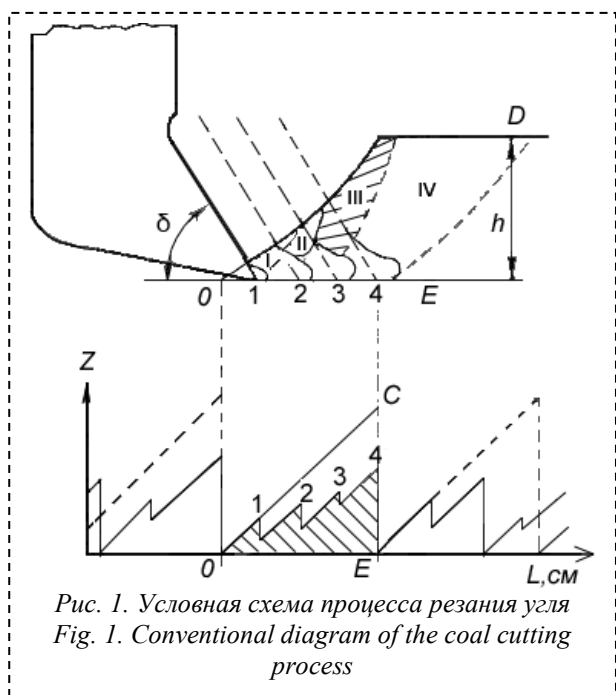


Рис. 1. Условная схема процесса резания угля
Fig. 1. Conventional diagram of the coal cutting process

Процесс резания угля представляет собой чередование местных отрывов от массива элементов стружки и отрывов крупных кусков. Условная схема процесса резания угля приведена на Рис. 1.

Согласно этой схеме, продвижение резца в промежутках между местными отрывами угля (I, II, III) сопровождается дроблением угля в контакте с резцом (заштрихованная зона) и удалением продуктов разрушения из ядра. Когда от массива отделяется крупный элемент, происходит завершение отдельного скола, что сопровождается практически мгновенным падением до нуля величины силы резания. Одновременно с отделением от массива крупного элемента и разгрузкой резца разрушается также уплотненное ядро, и процесс развития цикла резания начинается сначала.

В процессе резания впереди резца в угольном массиве образуются трещины. Разрушение таких массивов сопровождается реализацией ослаблений и нарушений сплошности, сформировавшихся в периоды образования угольного вещества, тектонических нарушений и отжима угольного пласта. На развитие трещин расходуется энергия значительно меньшая, чем при резании того же однородного материала, но одновременно при резании освобождается часть угольной мелочи, адекватная

энергии, затраченной природой на образование ослаблений и нарушений. Наличие ослаблений и нарушений приводит к нестабильности частоты сколов, что обуславливает различие в размерах крупных отделенных от угольного массива элементов.

При резании размеры отдельных кусков угля обычно больше, чем толщина стружки. Это происходит вследствие того, что сопротивления угля растяжению и сдвигу несравненно меньше сопротивления контактному дроблению, площадь контакта резца (по передней грани) обычно меньше сечения стружки. Опережающие трещины, распространяющиеся в сторону обнаженных поверхностей, разветвляются, создавая зону разрушения более широкую, чем ширина контакта. Однако крупные элементы нераздробленного угля, отделенные от массива, часто разрываются на несколько более мелких кусков под влиянием накопившейся в них до отделения упругой энергии.

Учитывая все вышеизложенное, особо подчеркнем тот факт, что в процессе резания угля режущими инструментами энергия, расходуемая на дробление угля, существенно превышает энергию, необходимую для нарушения его прочности. Последнее подтверждается данными работы [19] о распределении энергии в процессе резания угля режущими инструментами выемочных машин (Таблица 1).

Одним из существенных факторов, характеризующих процесс разрушения, являются свойства разрушаемой среды. Изучение свойств углей и горных пород как разрушаемых сред и разработка способов их оценки является самостоятельной научной проблемой, решению которой посвящено большое количество работ [16, 20–22].

Представление о путях решения данной проблемы базируется на том положении, что методы оценки свойств разрушаемых углей и горных пород должны разрабатываться применительно к конкретным процессам разрушения и обеспечивать возможность инженерных расчетов данных процессов в различных горно-геологических условиях [16–18, 23]. Так, применительно к расчетам процесса бурения в качестве характеристики свойств среды используется показатель буримости, для расчетов параметров взрыва породного массива – взрываемости, при механическом разрушении горных пород – контактная прочность и т. д.

Дальнейший анализ существующих способов оценки свойств углей выполним с целью выявления их пригодности для применения в инженерных расчетах процесса резания угля (расчет параметров

Таблица 1. Распределение энергии при резании угля
Table 1. Energy distribution during coal cutting

Процессы, на которые расходуется энергия	Распределение энергии, %
Диспергирование, в том числе:	96±98
- при дроблении передней гранью резца, включая образование пылевого ядра;	50±78
- при трении среднетупленного резца об уголь	20±46
Образование трещин и отрыв кусков угля от массива	1.0
Упругие деформации элементов выемочных машин	0.3±2.0

угледобывающих машин, определение области рационального применения машин различной конструкции, установление оптимальных норм нагрузки на забой и т. д.)

В настоящее время известно множество различных методов оценки разрушаемости углей при резании. Наиболее полно они описаны в работах [16–18]. Условно все существующие методы можно разделить на группы в зависимости от свойств или принципов, на основе которых они разработаны:

- химико-петрографические свойства;
- прочностные и упругие характеристики угля;
- показатели твердости;
- энергетические показатели;
- технические показатели работы угледобывающих машин;
- горно-технологические параметры.

1. Методы оценки разрушаемости угля по их химико-петрографическим свойствам. Эти методы основаны на том, что физические свойства углей определяются характером исходного материала угленакопления, петрографическим составом, степенью метаморфизма, количеством и характером твердых включений. Зависимости механических свойств углей от перечисленных выше факторов рассмотрены в работах [24, 25, 26]. При этом полученные зависимости, как правило, отражали лишь качественную картину изменения механических свойств углей. Кроме того, такого рода зависимости обычно действительны только в пределах одного угольного бассейна или района, так как при переходе к углям других бассейнов зависимости показателей их механических свойств от химико-петрографических факторов изменяются. Некоторые из установленных закономерностей находили частное применение при расчетах параметров и режимов работы угледобывающих машин. Так, в работе [27] используется качественная зависимость хрупко-пластических свойств углей от степени метаморфизма. В целом эти методы самостоятельного применения не получили.

2. Прочностные и упругие характеристики. Эти характеристики обычно применяют в качестве оценок механических свойств углей. Многочисленные исследования посвящены определению сопротивляемости угля отдельным видам элементарных напряжений: одноосному сжатию, растяжению, сдвигу на образцах как правильной формы, так и неправильной. В результате исследований выяснилось, что полученные результаты существенно варьируются и зависят от формы и размеров образцов и условий испытаний в такой же мере, как от особенностей состава и строения угольного пласта. Так, в работе [28] приводятся следующие данные –

Таблица 2.

Упругие свойства углей изучены в меньшей степени в основном из-за сложности испытаний. Различными исследователями для каменных углей и антрацитов определялись модули упругости, коэффициенты Пуассона, модули сдвига. Определения показателей упругих свойств характеризуются еще большим разбросом данных.

Так как уголь и горные породы находятся в основном в условиях трехосного неравномерного напряженного состояния, большинство работ посвящено исследованиям свойств среды на моделях с воссозданием условий нахождения их в массиве. По данным этих исследований прочностные и упругие характеристики горных пород и угля в условиях трехосного неравномерного сжатия отличаются нестабильностью и в значительной степени зависят от вещественного состава пород и их состояния, а также от методики испытаний. Кроме того, подобные испытания отличаются большой трудоемкостью. Однако некоторые исследователи считали возможным использование прочностных и упругих характеристик при расчете нагрузок на исполнительных органах угледобывающих машин. Так, Слободкин М. И. [29] с позиций теории упругости разработал аналитическую теорию резания угля, в которой для вычисления предельных сдвигающих напряжений необходимо определить на образцах неправильной формы девять упругих констант. Практического применения эти работы не получили.

Фролов А. Г. [30] пытался для расчета процесса разрушения угля исполнительными органами угледобывающих машин учитывать следующие свойства углей: предел прочности на внедрение, предел прочности на сдвиг, предел прочности на растяжение, размеры отдельностей, трещиноватость. Однако получение достоверных характеристик прочности и упругости угольных пластов связано с большим количеством трудоемких экспериментальных работ, поэтому практическое использование метода расчета на основе прочностных и упругих характеристик не получили. Обоснованные возражения, связанные с применением подходов, базирующихся на традиционных константах механических свойств, приводятся в работе Берона А. И. [31]. Кратко они сводятся к следующему. Прочностные и упругие характеристики угля относятся к частным оценкам, определяемым в лабораторных условиях, и поэтому не оценивают состояние угля в массиве. Показатели прочностных и упругих свойств среды не отражают протекания процесса разрушения за пределами появления первого при-

Таблица 2. Распределение энергии при резании угля

Table 2. Values of the uniaxial compressive strength of coal seams

Вид нагрузки	Предел изменения временного сопротивления, кгс/см ²	Кратность изменения показателя прочности
Сжатие	30÷600	20
Сдвиг	15÷180	12
Растяжение	0,5÷30	60

знака разрушения, а процесс резания угля продолжается далеко за его пределами. Учитывая вышеизложенные причины, Берон А. И. подчеркнул, что разработка чисто аналитической теории резания угля не имеет перспектив.

3. Показатели твердости – сопротивления местному разрушению исследуемого образца при внедрении в него инструмента получили некоторое распространение в качестве как лабораторных, так и забойных методов оценки свойств угля [32, 33]. Их применение обосновано тем, что одним из элементов процесса резания является внедрение инструмента в породу.

Для оценки свойств хрупких горных пород, которые разрушаются с мелкими толщинами и сечениями стружки (т. е. разрушение происходит в так называемом приповерхностном слое), показатели твердости (например, контактная прочность) широко применяются в промышленности. При разрушении углей исполнительными органами угледобывающих машин, для режимов работы которых характерны большие сечения стружки, применение для оценки свойств углей показателей твердости затруднительно, так как в силу структурных особенностей углей (в частности, их высокой трещиноватости) инденторами малых сечений возможно определить лишь твердость отдельных петрографических ингредиентов (микротвердость), но не разрушаемого массива угля в целом.

Попытка учета масштабного фактора разрушения, иначе говоря применение инденторов больших сечений приводила к созданию громоздкой аппаратуры – например, пенетрометров в Англии. Кроме того, применение таких методов и аппаратуры не позволяло решить вопрос об оценке твердости угля в глубине угольного массива.

4. Энергетические методы оценки разрушаемости основаны на определении энергии, затраченной на разрушение. Известно несколько гипотез для определения энергоемкости разрушения. Так, в соответствии с гипотезой Риттингера затраты энергии на разрушение прямо пропорциональны вновь образованной поверхности при разрушении образца породы. Гипотеза Кирпичева-Кика состоит в том, что затраты энергии при разрушении пропорциональны объему разрушения. П. А. Рибиндер предложил обобщенное выражение для обеих гипотез, согласно которому общие затраты энергии на разрушение образца складываются из энергии, затраченной на образование новых поверхностей, и энергии, необходимой для отделения определенно-го объема испытуемого образца.

В связи с тем, что при добычании углей механическим способом расход энергии на измельчение угля (на образование новых поверхностей) значительно превышает энергию на отделение объема угля от массива, в основу энергетических методов определения разрушаемости углей в большинстве случаев положена гипотеза Риттингера. Известны различные энергетические методы определения дробимости, крепости и т. д. при размоле пород в барабанах и мельницах [34], сбрасывании кусков угля с заданной высоты [35], падении на уголь гру-

за [36], дробления в заданном объеме [37]. Довольно широко в промышленности также применяется показатель крепости угля по методу толчения [38], в котором величина вновь образованной поверхности оценивается по объемному выходу мелочи размером менее 0,5 мм. Достоинством всех этих методов является то, что они достаточно просто позволяют производить массовые измерения, результаты которых при этом характеризуются малым разбросом значений.

Для оценки сопротивляемости углей резанию Лейбов Б. М. разработал метод раздробливания [37], в котором за показатель сопротивляемости был принят коэффициент пропорциональности между удельной энергией разрушения и процентным выходом штыба класса менее 0,22 мм в разрушенном образце угля.

В настоящее время энергетические методы определения сопротивляемости резанию практически не применяются. Основные причины, в силу которых энергетические показатели, основанные на различных вариантах дробления угля, оказались непригодны, по-видимому, связаны, во-первых, с особенностями самих методов, где к разрушаемому углю прикладывается энергия заданной величины, а во-вторых, в этих методах не учитывается при одинаковых режимах разрушения различная дисперсность продуктов разрушения, которая одновременно зависит [16] как от режимных параметров, так и от структурных особенностей угля. Последнее приводит к неточной оценке величины вновь образованной поверхности. Экспериментально установлено [17], что при одинаковом объеме пылевых фракций класса 0-0,5 мм, которым характеризуется величина вновь образованной поверхности по методу определения крепости угля толчением, в зависимости от параметров гранулометрического состава величина суммарной поверхности может отличаться в 6-7 раз, что и приводит к различным затратам энергии при разрушении углей одинаковой крепости. Кроме этого, одной из причин того, что энергетические методы не нашли широкого применения, является невозможность оценки свойств угля по мере заглубления в массив, что очень важно при выборе параметров исполнительных органов угледобывающих машин.

5. Технические показатели работы угледобывающих машин ранее широко применялись в промышленности для оценки добываемости углей при нормировании горных работ. При этом оценка добываемости углей проводилась по показателям работы угледобывающих машин (скорость подачи врубовых машин и комбайнов, время чистого бурения одного погонного метра шпура электросверлами, часовая производительность отбойного молотка, удельный расход резцов). Основные недостатки, связанные с данным методом оценки разрушаемости углей, сводятся к тому, что показатели работы машин в большей степени зависят от их технических характеристик и технологических ограничений, которые сказываются на величине скорости подачи, и изменение ее может явиться формальной причиной для перевода данного угля в другой класс

разрушаемости. Кроме того, получаемые показатели пригодны только для машин данного типа, поэтому использование их для расчета параметров и области применения новых машин не представляется возможным.

6. Горнотехнические показатели, под которыми понимаются интегральные характеристики угля и пород, которые устанавливаются экспериментально и характеризуют поведение разрушаемого материала при воздействии на него конкретным инструментом в эталонном режиме. Горнотехнической характеристикой, определяющей разрушающие свойства угля в процессе его резания угледобывающими машинами, является показатель сопротивляемости угля резанию, который определяется путем осуществления рабочего процесса с помощью

специальных приборов.

В работе Позина Е. З. [27] подробно проанализированы наиболее известные приборы для определения сопротивляемости углей резанию (Таблица 3). Анализ показал, что в качестве критерия разрушаемости исследователями предлагались различные показатели (как силовые, так и энергетические), которые определялись при эталонных режимах резания, но не были связаны с конкретными методами расчета параметров процесса резания. Основная же задача разработки способа оценки сопротивляемости разрушению угля неразрывно связана с более общей задачей – разработкой метода расчета нагрузок на исполнительных органах для выбора их оптимальных параметров применительно к конкретным условиям эксплуатации. В

Таблица 3. Классификация способов оценки разрушаемости углей при резании различными приборами
Table 3. Classification of test methods for coal cuttability using various instruments

Наименование прибора	Способ резания	Показатель разрушаемости	Возможность оценки			
			сил резания		удельных энергозатрат	
			в месте опыта	по глубине массива	в месте опыта	по глубине массива
ПКС-1	Скалывание по напластованию до 0,5 м	Сопротивление скалыванию $R_{ск} = P_{ск} / S$, кгс/см ²	Нет	Нет	Возможно	Затруднительно
Английский гидравлический прибор для строгания	То же до 0,26 м	Удельное усилие внедрения $P_{уд} = \frac{P}{l}$, кгс/см. Энергоемкость резания, квт-ч/м ³ .	Возможно	Затруднительно	Возможно	Затруднительно
ДКС-2	Резание вдоль напластования по дуге	Сила резания $A = \frac{Z}{h}$, кгс/см. Энергоемкость резания $H_w = \frac{0,0272Z}{S}$, квт-ч/м ³ .	Возможно	Возможно, но при длительных определениях	Возможно	Возможно, но при длительных определениях
Вильямса	Резание перпендикулярно направлению напластования	Сопротивление резанию $\varphi = \frac{Z}{S}$, кгс/см ²	Нет	Нет	Возможно	Возможно
СДМ-1	Вращательное резание с постоянной подачей	Средняя сила резания $A = \frac{Z}{h}$, кгс/см.	Возможно	Возможно	Нет	Нет
ПР-4	Резание перпендикулярно направлению напластования	Сила резания $A = \frac{Z}{h}$, кгс/см.	Возможно	Возможно	Нет	Нет

такой постановке задача была решена в ИГД им. А. А. Скочинского [16, 27, 35] с помощью специально разработанного показателя сопротивляемости угля резанию A (кгс/см), который представляет собой приращение силы резания на 1 см толщины стружки при резании в стандартных условиях, осуществляемом с помощью прибора типа ДКС или СДМ непосредственно в забоях угольных шахт. Основным достоинством этого критерия является возможность оценки свойств разрушаемых углей в реальных условиях эксплуатации угледобывающих машин с учетом влияния горного давления и миграции газа. Кроме этого, показатель сопротивляемости угля резанию возможно определять в любой точке призабойной части угольного массива.

В дальнейшем с целью расширения области применения данного показателя на пласты сложного строения был предложен эквивалентный показатель сопротивляемости пласта резанию $A_э$ (Н/мм), учитывающий содержание в пласте породных прослоек и крупных твердых включений [18, 39].

Показатель $A_э$ определяется по формуле:

$$A_э = A_{уг} + A_n^* \quad (1)$$

где $A_{уг}$ – сопротивляемость угля резанию, Н/мм; A_n^* – обобщенный показатель содержания и свойств неоднородностей в пласте, определяемый по формуле:

$$A_n^* = A_{вкл}^* + A_{п.п.}^* \quad (2)$$

где $A_{вкл}^*$ – обобщенный показатель содержания и свойств твердых включений, Н/мм; $A_{п.п.}^*$ – обобщенный показатель содержания и свойств породных прослоек, Н/мм.

Значения $A_{вкл}^*$ и $A_{п.п.}^*$ определяются по следующим эмпирическим зависимостям:

$$A_{вкл}^* = 0,45 \sigma_{сж}^{1,19} K_{вкл}^* S_{вкл}^* \cdot d_n; \quad (3)$$

$$A_{п.п.}^* = 0,35 \sigma_{сж}^{1,19} K_{п.п.}^* S_{п.п.}^*; \quad (4)$$

где $\sigma_{сж}$ – временное сопротивление одноосному сжатию образца породы; $S_{вкл}^*$, $S_{п.п.}^*$ – соответственно удельное содержание в пласте твердых включений и породных прослоек.

Коэффициент K_n ($K_{вкл}$, $K_{п.п.}$)

$$K_n = \frac{A_n - A_{уг}}{A_{уг}}, \quad (5)$$

где A_n – средняя сопротивляемость резанию неоднородностей (твердых включений $A_{вкл}^*$, породных прослоек $A_{п.п.}^*$ соответственно).

Величина d_n описывает долю включений, перерезаемых резами, и принимается:

для раздробленных включений – 0,87;

для нераздробленных включений – 0,9;

для консолидированных включений – 0,99.

В настоящее время показатели сопротивляемости резанию углей и угольных пластов сложного строения, которые отражают их способность противостоять механическим воздействиям, возникающим в процессе резания, повсеместно используются в угольной промышленности России.

Для определения сопротивляемости угольных пластов резанию разработаны методы и аппаратура, с помощью которых в широких масштабах выполнена количественная оценка этого показателя для угольных пластов основных бассейнов России.

Последнее позволяет использовать этот показатель в качестве основного критерия физико-механических свойств угольных пластов при расчете нагрузок, действующих на резы исполнительных органов угледобывающих машин.

Выводы

1. Начальные исследования по изучению теоретических основ разрушения, как правило, проводились на однородных, изотропных телах и были направлены на изучение природы неожиданного хрупкого разрушения, связанного с внезапным выходом из строя составных частей конструкций, свойства которых существенным образом отличались от угля. При этом исследования проводились в основном в условиях одноосного напряженного состояния, в отличие от угля и горных пород, которые в массиве испытывают сложное напряженное состояние и отличаются значительной неоднородностью строения.

2. Дальнейшие исследования были направлены на способы оценки свойств углей для их применения в инженерных расчетах при выборе параметров вновь создаваемых угледобывающих машин и определения области их рационального применения. При этом были созданы методы, основанные на химико-петрографических, прочностных и упругих характеристиках угля, показателях их твердости, а также на энергетических и технико-технологических показателях работы угледобывающих машин. Однако в силу различных причин, в основном связанных с игнорированием состояния и свойств угля в реальных условиях залегания угольного пласта, эти методы в современной практике угольного машиностроения не получили распространения.

3. В настоящее время в качестве критерия оценки разрушаемости предложен показатель сопротивляемости резанию, который позволяет оценивать свойства угольных пластов простого и сложного строения в реальных условиях эксплуатации угледобывающих машин и тем самым использовать этот показатель в качестве основного критерия физико-механических свойств угольных пластов при расчете нагрузок, действующих на резы исполнительных органов комбайнов и струговых установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М. : Наука, 1974. 640 с.
2. Оберт Л. Хрупкое разрушение гордых пород В кн.: Разрушение. М. : Мир, 1976. Т. I. 734 с.
3. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении // Прикладная математика и теоретическая физика. 1964. № 4. С. 3–56.
4. Билби Б., Эшелби Дж. Дислокации и теории разрушения. В кн.: Разрушение. М. : Мир, 1973. Т. I. С. 112–203.
5. Регель В. Р., Слущкар А. И. Кинетическая природа прочности. В кн.: Физика сегодня и завтра. Л. : Наука, 1973. С. 90–175.
6. Докукин А. В. Проблемы комплексной механизации выемки угля и физические основы прочно-

сти горных пород // Научн. тр. ИГД им. А. А. Скочинского, 1974. Вып. 117. С. 3–13.

7. Фрейденталь А. М. Статистический подход к хрупкому разрушению. В кн.: Разрушение. М. : Мир, 1975. Т. 1. С. 616–645.

8. Протодяконов М. М., Тедер Р. И. Исследование процесса разрушения угля методом крупного скола. М. : Госгортехиздат, 1960. 342 с.

9. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Комплексное влияние размеров образца горной породы на величину предела прочности на сжатие // ГИАБ. 2022. № 8. С. 5–14.

10. Стариков Г. П., Мельник Т. Н., Корвякова Н. П., Нескреба Д. А. Модернизированный метод определения прочности диспергированных горных пород и углей, основанный на модели Герца // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2023. Т. 10. № 2. С. 66–72.

11. Мерзляков В. Г., Деревяшкин И. В., Бойкова И. Е., Толмачев А. И. Разрушение угля и горных пород высокоскоростными струями воды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 4. С. 140–156.

12. Xiao S., Re Q., Cheng Y., Zhao H., Cao Sh., Zhang L., Chen B., Meng X. Damage and fracture characteristics of rocks with different structures under high-velocity water jet impact // Engineering Fracture Mechanics. 2021.

13. Gajst H., Shalev E., Weinberger R., Marco S., Zh W., Lyakhovsky V. Relating strain localization and Kaiser effect to yield surface evolution in brittle rocks // Geophysical Journal International. 2020. Vol. 221. № 3. Pp. 2091–2103.

14. Carbillet L., Heap M.J., Baud P., Wadsworth F.B., Reuschlé T. Mechanical Compaction of Crustal Analogs Made of Sintered Glass Beads: The Influence of Porosity and Grain Size // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2021.

15. Берон А. И., Казанский А. С., Лейбов Б. М., Позин Е. З. Резание угля. М. : Госгортехиздат, 1962. 469 с.

16. Позин Е. З., Меламед В. З., Тон В. В. Разрушение углей выемочными машинами. М. : Недра, 1984. 288 с.

17. Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Основы выбора параметров угледобывающих машин применительно к конкретным условиям эксплуатации : монография. М. : РУСАЙНС, 2023. 336 с.

18. Берон А. И., Позин Е. З. Об оценке энергетического баланса процесса резания углей // Научн. тр. ИГД им. А. А. Скочинского, 1972. Вып. 93. С. 10–20.

19. Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Разрушение угольных пластов при добыче выемочными машинами : монография. М. : ИНФРА-М, 2022. 319 с.

20. Сукнев С. В. Влияние условий водонасыщения на статические упругие свойства карбонатных

пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2024. № 1. С. 15–25.

22. Ройтер М., Крах М., Кислинг У., Векслер Ю. А. Акустический шум угольного пласта как показатель геодинамического состояния очистного забоя // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 1. С. 23–30.

23. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М. : Недра, 1978. 390 с.

24. Evans I. The tensile strength of coal – Colliery Engineering. 1961. № 452. Pp. 428–434.

25. Амосов И. И., Еремин И. В. Трещиноватость углей. М. : Изд-во АН СССР, 1960. 108 с.

26. Барон Л. И. Горнотехнологическое породоведение. М. : Наука, 1977. 324 с.

27. Позин Е. З. Сопrotивляемость углей разрушению режущими инструментами. М. : Наука, 1972. 238 с.

28. Докукин А. В., Фролов А. Г., Позин Е. З. Выбор параметров выемочных машин. М. : Наука, 1976. С. 14–15.

29. Слободкин М. И. Основы аналитической теории резания углей. М. : Углетехиздат, 1947. 207 с.

30. Фролов А. Г. Определение усилий отбойки угля шнековыми исполнительными органами выемочных машин. В кн.: Динамика и прочность горных машин. Киев: Наукова думка, 1976. С. 35–45.

31. Берон А. И. О применимости основных положений теории упругости и пластичности к определению рациональных параметров исполнительных органов угледобывающих машин. В кн.: проблемы горного дела. М. : Недра, 1974. С. 241–247.

32. Гвоздева Н. Н. Угли подмосковного бассейна и их классификация по физико-механическим свойствам. М. : Углетехиздат, 1948. 157 с.

33. Глущенко И. М. Петрографическая характеристика и ее значение для оценки свойств углей. М. : Недра, 1971. 113 с.

34. Соколов Н. В. Сопrotивляемость углей разлому. М. : Госэнергоиздат, 1951. 37 с.

35. Позин Е. З. Метод определения трещиноватости углей // Научн. тр. КНИУИ. 1958. Вып. 3. С. 392–401.

36. Протодяконов М. М. Определение крепости угля на шахтах // Уголь. 1950. № 9. С. 20–24.

37. Лейбов Б. М. Исследование механических процессов разрушения углей. М. : Углетехиздат, 1950. 35 с.

38. Микулина Н. В. Определение прочности угля // Научн. тр. Всесоюзного теплотехнического института. 1941. № 6. С. 17–21.

39. Линник Ю. Н., Шерсткин В. В., Линник В. Ю. Интегральный показатель оценки разрушаемости угольных пластов. // Горный журнал. 2015. № 8. С. 16–18.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Линник Юрий Николаевич, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления» (109542, Российская Федерация, г. Москва, ул. Рязанский проспект, 99), докт. техн. наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3968-0026, e-mail: ylinnik@rambler.ru

Линник Владимир Юрьевич, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления» (109542, Российская Федерация, г. Москва, ул. Рязанский проспект, 99), докт. экон. наук, доцент, ORCID: 0000-0001-5130-8222, e-mail: d0c3n7@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Линник Юрий Николаевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Линник Владимир Юрьевич – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-94-104

Yuri N. Linnik, Vladimir Yu. Linnik *

State University of Management

* for correspondence: d0c3n7@gmail.com

EVALUATION OF ROCK AND COAL FRACTURE PROCESSES: A METHODOLOGICAL ANALYSIS FOR VARIOUS LOADING REGIMES

Abstract.

One of the preconditions for the optimal performance and reliability of coal mining machinery is the correspondence of its design parameters to the physical and mechanical properties of the coal seams being extracted. Therefore, when solving tasks related to calculating the parameters and operating modes of mining machines, determining their rational application range, estimating face load, etc., an indicator is required that integrally accounts for the strength properties of coal seams.

In this regard, for many years, various countries, including Russia, have conducted theoretical and experimental research to find methods and criteria for assessing the brittle fracture of various materials, including rocks and coals. This research has united specialists from many disciplines: solid-state physics; continuum mechanics; materials science; engineering design; etc.

While acknowledging the undeniable contributions of predecessors in the field of brittle fracture, it should be noted that their obtained results and methods are of limited scope and cannot be fully applied to evaluating coal seams as objects destroyed by the cutters of mining machine toolheads. The accumulated knowledge in brittle fracture has allowed for the development of equipment, a method, and criteria for assessing coal seams in relation to selecting optimal parameters for coal mining machinery.

The article reviews the primary methods for assessing brittle fracture proposed at various times by Russian and foreign scientists, which ultimately led to the development of a universally accepted indicator for the cuttability resistance of coal seams.



Article info

Received:

19 December 2025

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

15 June 2026

Keywords: brittle failure, cutting, rock, coal, assessment method, hardness, strength, petrographic-chemical properties, energy indicators, cuttability resistance

For citation: Linnik Yu.N., Linnik V.Yu. Evaluation of rock and coal fracture processes: a methodological analysis for various loading regimes. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 3(185):94-104 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-94-104, EDN: SEGPOB

REFERENCES

1. Cherepanov G.P. Mechanics of brittle fracture. Moscow: Nauka; 1974. 640 p. [In Russ].

2. Obert L. Brittle fracture of rocks. In: Fracture. Moscow: Mir; 1976. Vol. 7. Part 1. 734 p. [In Russ].

3. Barenblatt G.I. Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1964; 4:3–56. [In Russ].
4. Bilby B., Eshelby J. Dislocations and theories of fracture. In: *Fracture*. Moscow: Mir; 1973. Vol. 1. Pp. 112–203. [In Russ].
5. Regel V.R., Slutsker A.I. Kinetic nature of strength. In: *Physics today and tomorrow*. Leningrad: Nauka; 1973. Pp. 90–175. [In Russ].
6. Dokukin A.V. Problems of complex coal mining mechanization and physical basis of rock strength. *Proceedings of the A.A. Skochinsky Institute of Mining*. 1974; 117:3–13. [In Russ].
7. Freudenthal A.M. A statistical approach to brittle fracture. In: *Fracture*. Moscow: Mir; 1975. Vol. 2. Pp. 616–645. [In Russ].
8. Protodyakonov M.M., Teder R.I. Study of coal fracture by large-scale spalling method. Moscow: Gostekhizdat; 1960. 342 p. [In Russ].
9. Zhabin A.B., Polyakov A.V., Averin E.A., Linnik Yu.N., Linnik V.Yu. Complex effect of rock sample dimensions on the value of the compressive strength limit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022; 8:5–14. [In Russ].
10. Starikov G.P., Melnik T.N., Korzyakova N.P., Neskreba D.A. Upgraded method for determining the strength of dispersed rocks and coals based on the Hertz model. *Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences*. 2023; 10(2):66–72. [In Russ].
11. Merzlyakov V.G., Derevyashkin I.V., Boikova I.E., Tolmachev A.I. Fracture of coal and rocks by high-speed water jets. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; 4:140–156. [In Russ].
12. Xiao S., Re Q., Cheng Y., Zhao H., Cao Sh., Zhang L., Chen B., Meng X. Damage and fracture characteristics of rocks with different structures under high-velocity water jet impact. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021.
13. Gajst H., Shalev E., Weinberger R., Marco S., Zh W., Lyakhovsky V. Relating strain localization and Kaiser effect to yield surface evolution in brittle rocks. *Geophysical Journal International*. 2020; 221(3):2091–2103.
14. Carbillet L., Heap M.J., Baud P., Wadsworth F.B., Reuschlé T. Mechanical Compaction of Crustal Analogs Made of Sintered Glass Beads: The Influence of Porosity and Grain Size. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021.
15. Beron A.I., Kazanskiy A.S., Leybov B.M., Pozin E.Z. Coal cutting. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Mining; 1962. 469 p. [In Russ].
16. Pozin E.Z., Melamed V.Z., Ton V.V. Coal destruction by mining machines. Moscow: Nedra; 1984. 288 p. [In Russ].
17. Linnik Yu.N., Linnik V.Yu. Fundamentals of selecting parameters of coal mining machines for specific operating conditions: monograph. Moscow: RuScience; 2023. 336 p. [In Russ].
18. Beron A.I., Pozin E.Z. On the assessment of the energy balance of the coal cutting process. *Proceedings of the A.A. Skochinsky Institute of Mining*. 1974; 93:10–20. [In Russ].
19. Linnik Yu.N., Linnik V.Yu. Destruction of coal seams during mining with extraction machines: monograph. Moscow: INFRA-M; 2002. 319 p. [In Russ].
20. Sukhnev S.V. Influence of water saturation conditions on the static elastic properties of carbonate rocks. *Journal of Mining Science*. 2024; 1:15–25. [In Russ].
22. Reuter M., Krach M., Kissling U., Veksler Ya.A. Acoustic noise of a coal seam as an indicator of the geodynamic state of a longwall face. *Journal of Mining Science*. 2022; 1:23–30. [In Russ].
23. Rzhnevsky V.V., Novik G.Ya. Fundamentals of rock physics. Moscow: Nedra; 1978. 390 p. [In Russ].
24. Evans I. The tensile strength of coal. *Colliery Engineering*. 1961; 452:428–434.
25. Amosov I.I., Eremin I.V. Coal fracturing. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1960. 108 p. [In Russ].
26. Baron L.I. Mining technological petrology. Moscow: Nauka; 1977. 324 p. [In Russ].
27. Pozin E.Z. Coal resistance to destruction by cutting tools. Moscow: Nauka; 1972. 238 p. [In Russ].
28. Dokukin A.V., Frolov A.G., Pozin E.Z. Selection of parameters for mining machines. Moscow: Nauka; 1976. Pp. 14–15. [In Russ].
29. Slobodkin M.I. Fundamentals of the analytical theory of coal cutting. Moscow: Ugletekhizdat; 1947. 207 p. [In Russ].
30. Frolov A.G. Determination of forces for coal breaking by screw-type extraction organs of mining machines. In: *Dynamics and strength of mining machines*. Kiev: Naukova Dumka; 1976. Pp. 35–45. [In Russ].
31. Beron A.I. On the applicability of the basic principles of elasticity and plasticity theory for determining rational parameters of coal mining machine executive organs. In: *Problems of mining*. Moscow: Nedra; 1974. Pp. 241–247. [In Russ].
32. Gvozdeva N.N. Coals of the Moscow Basin and their classification by physical and mechanical properties. Moscow: Ugletekhizdat; 1948. 157 p. [In Russ].
33. Glushchenko I.M. Petrographic characteristics and its significance for assessing coal properties. Moscow: Nedra; 1971. 113 p. [In Russ].
34. Sokolov N.V. Coal resistance to fracture. Moscow: State Energy Publishing House; 1951. 37 p. [In Russ].
35. Pozin E.Z. Method for determining coal fracturing. *Proceedings of the KNIUI*. 1968; 3:392–401. [In Russ].
36. Protodyakonov M.M. Determining coal strength in mines. *Ugol'*. 1950; 9:20–24. [In Russ].
37. Leybov B.M. Study of mechanical processes of coal destruction. Moscow: Ugletekhizdat; 1950. 35 p. [In Russ].
38. Mikulina N.V. Determination of coal strength. *Proceedings of the All-Union Heat Engineering Institute*. 1941; 6:17–21. [In Russ].
39. Linnik Yu.N., Sherstkin V.V., Linnik V.Yu. Integral indicator for assessing the cuttability of coal seams. *Mining Journal*. 2015; 8:16–18. [In Russ].

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Yuriy N. Linnik, professor, «State University of Management» (109542, Russian Federation, Moscow, Ryazansky prospect, 99, Ryazansky str.), Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0003-3968-0026, e-mail: ylinnik@rambler.ru

Vladimir Yu. Linnik, professor, «State University of Management» (109542, Russian Federation, Moscow, 99, Ryazansky Prospekt St., Moscow), Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, ORCID: 0000-0001-5130-8222, e-mail: d0c3n7@gmail.com.

Contribution of the authors:

Yuriy N. Linnik – research problem statement; conceptualisation of research, data collection and analysis, drawing the conclusions, writing the text.

Vladimir Yu. Linnik – scientific management, reviewing relevant literature, writing the text

Authors have read and approved the final manuscript.

