

**ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ,  
ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР  
MINING AND OIL AND GAS FIELD GEOLOGY, GEOPHYSICS,  
SURVEYING AND SUBSURFACE GEOMETRY**

Научная статья

УДК 622.831:620.192.7

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-126-134

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И  
ЭНЕРГИЮ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ**

Елкин Иван Сергеевич, Данилов Павел Андреевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

\* для корреспонденции: eis.fiz@kuzstu.ru



**Информация о статье**

Поступила:

09 февраля 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:

15 сентября 2026 г.

**Ключевые слова:**

уголь, влажность, внутреннее трение, энергия разрушения, трибология, степень метаморфизма, трещиноватость

**Аннотация.**

Уделяется внимание трибологическим явлениям в угольном массиве, приведен обзор исследований, библиографии по проблеме внутреннего трения в угольном массиве. Представлены результаты модельных расчетов. Придается значение влиянию геомеханических процессов в угольном массиве на состояние экологической ситуации при ведении горных работ. Приведенные модельные расчеты показывают уменьшение энергии, необходимой для разрушения угля, в два раза при увеличении его влажности, а также влияние пористости, трещиноватости на проявление внутреннего трения в массиве. Указанные факторы рассматриваются как основные, которые оказывают влияние на устойчивость бортов горной выработки при подземной разработке угольных пластов, также важны контроль напряженного геомеханического состояния угольного массива в краевой части при проведении противовибросных мероприятий, увлажнение угольных пластов, дегазация, что указывает на то, что при сдвигах, обрушениях и деформациях горных пород происходит перераспределение накопленной энергии в массиве, часть этой энергии расходуется на тепловыделение, а часть – на образование новых поверхностей трещин. Трение в толще угольного массива определяется совокупностью физико-механических свойств и геомеханических характеристик угля, а также условиями его залегания. Наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на сопротивление сдвигу, являются локальные напряжения, связанные с условиями залегания пласта, и механизмы разрушения, а также марка угля, степень метаморфизма, глубина залегания пласта и связанные с ней напряжения, пористость, трещиноватость и уровень влажности угля.

**Для цитирования:** Елкин И.С., Данилов П.А. Влияние влажности на механические свойства и энергию разрушения угля // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 126-134. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-126-134, EDN: RWXQED

**Введение**

Согласно данным портала Mining-portal.ru, за период 2013–2023 гг. выбросы пыли и газов от предприятий угольной отрасли России увеличились с 233 тыс. т до 549 тыс. т в год [1].

Одним из факторов, влияющих на образование пылевых выбросов, являются процессы трения внутри угольного массива. Трение по трещинам и контактными поверхностям приводит к локальному нагреву, нарушению структуры угля

и его последующему измельчению, что способствует формированию мелкодисперсной угольной пыли [2].

В угольных пластах трение играет двойственную роль. С одной стороны, оно способствует удержанию и устойчивости пород, а с другой – приводит к локальному тепловыделению, структурным изменениям и измельчению угля [3].

Современные геофизические и трибологические исследования показывают, что трение в горных массивах представляет собой не просто сопротивление движению, а комплексный физический процесс, включающий деформацию, разрушение и перераспределение энергии в породе. Контроль параметров трения является важной частью анализа напряженно-деформированного состояния массива и поведения пород при нагрузке.

Трение возникает при соприкосновении двух поверхностей, включая контактные плоскости и трещины внутри горных пород. На микроскопическом уровне трение определяется неровностями поверхности и силами межмолекулярного взаимодействия, которые в горных массивах проявляются в виде микрозахватов и адгезионных связей между зернами породы, формирующих реальную площадь контакта между поверхностями трения (Рис. 1) [4].

#### Методы исследования

Согласно молекулярно-механической теории, разработанной И. В. Крагельским, трение обусловлено как преодолением сил молекулярного взаимодействия между контактирующими поверхностями, так и формоизменением рельефа контактирующих тел в результате упругих и пластических деформаций их поверхностных слоев [5].

При сдвигах, обрушениях и деформациях пород происходит перераспределение энергии, накопленной в массиве. Часть этой энергии расходуется на тепловыделение, а часть – на образование новых поверхностей трещин [4].

Энергетический подход к анализу трения был предложен П. А. Ребиндером и получил развитие в работах геофизиков и геомехаников. Полная работа, затраченная на диспергирование твердого тела, выражается как сумма энергии объемной деформации и энергии, идущей на образование новой поверхности [6]:

$$W = k_{\text{пр}}V + \alpha_{\text{п}}\Delta S, \quad (1)$$

где  $k_{\text{пр}}$  – работа объемного деформирования единицы объема;  $V$  – объем тела,  $\alpha_{\text{п}}$  – энергия образования единицы новой поверхности;  $\Delta S$  – приращение площади поверхности при разрушении.

Это выражение отражает, что при воздействии внешних сил энергия расходуется на упругое и пластическое деформирование породы и на рост площади новых трещин. В угольных пластах эти процессы приводят к образованию и выделению тепла, изменению электропроводности и электрокинетическим эффектам [4].

Трение в толще угольного массива определяется совокупностью физико-механических свойств и геомеханических характеристик угля и условий его залегания. Наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на сопротивление сдвигу, локальные напряжения и механизмы разрушения, являются марка угля, степень метаморфизма, глубина залегания пласта и связанные с ней напряжения, а также пористость, трещиноватость и уровень влажности угля.

Марка угля, отражающая степень его метаморфизма, определяет структуру порового пространства, степень упорядоченности углеродистой матрицы и механическую прочность. Для углей низшей степени метаморфизма (марки Д и Г) характерен высокий выход летучих веществ 35–45%, развитая система мезо- и макропор (пористость 8–15%) и повышенная деформируемость, что приводит к снижению сопротивления сдвигу и уменьшению параметров сцепления и угла внутреннего

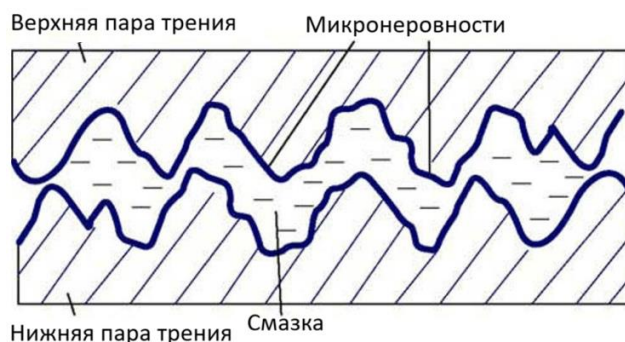


Рис. 1. Схематическое изображение взаимодействия микронеровностей поверхностей при трении в угле

Fig. 1. Schematic representation of the interaction of micro-dimensions of surfaces during friction in coal

трения.

С увеличением степени метаморфизма угля объем пор уменьшается, структура уплотняется, а параметры трения и прочности возрастают, что подтверждено экспериментальными исследованиями микроструктуры и механического отклика для углей различных марок [7].

При уровнях нормальных напряжений 4–7 МПа, характерных для глубин ведения горных работ порядка 200–300 м, в угольном массиве наблюдается частичное закрытие микротрещин и снижение эффективной пористости. Экспериментальные наблюдения показывают, что при увеличении нормального давления в этом диапазоне пористость для углей низшей степени метаморфизма (марки Д, Г) уменьшается в среднем на 2–4%, а доля открытых мезо- и макропор существенно сокращается за счет уплотнения угольного вещества [7, 8].

Одновременно с этим возрастает жесткость деформационного отклика и проявляется переход к более хрупкому характеру разрушения. По данным лабораторных трехосных испытаний угольных образцов, повышение нормальных напряжений с 2–3 до 6–8 МПа приводит к снижению предельных деформаций до разрушения на 20–35% и выраженной локализации сдвига в узких зонах, что связано с концентрацией напряжений на ограниченных участках контакта [8]. Указанные процессы существенно влияют на механизмы разрушения угольного массива и перераспределение энергии в зоне нагружения.

Пористость и степень трещиноватости формируют реальные площади контакта и пути развития деформаций. Для углей марок Д–Г характерна открытая пористость 8–15% [7], при которой снижается эффективная площадь контакта между структурными элементами и облегчается разрушение межзерновых связей при сдвиге. Развитая система трещин с плотностью 8–15 трещин на метр и средним раскрытием 0,3–0,5 мм формирует ослабленные зоны, по которым происходит концентрация локальных касательных напряжений в 1,8–3,0 раза ниже по сравнению с однородным массивом [8, 14, 15].

Влажность и насыщение пор водой оказывают выраженное разупрочняющее воздействие на угольную структуру. По данным лабораторных сдвиговых и трехосных испытаний, при переходе от сухого состояния к водонасыщенному межзерновое сцепление уменьшается на 40–60%, а угол внутреннего трения снижается на 8–12°, что существенно облегчает развитие сдвиговых деформаций и разрушение угольного массива [9, 10].

Совокупность указанных факторов проясняет механизм влияния внутреннего трения в

угольных пластах на условия формирования очагов деформаций и разрушений в массиве.

Сила трения в горных породах описывается критерием Мора-Кулона, который связывает сдвиговое напряжение с нормальным напряжением и внутренними свойствами пород [11]:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где  $\tau$  – сдвиговое напряжение (касательная сила трения на плоскости контакта);  $\sigma$  – нормальное напряжение на плоскости контакта,  $c$  – сцепление, когезия, характеризующее внутреннюю прочность пород, независимую от давления;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, отражающий сопротивление относительному сдвигу под действием нормальных напряжений.

Величина параметров  $c$  и  $\varphi$  зависит от минерального состава, структуры и влажности пород. При сухих условиях значения сцепления и угла внутреннего трения выше, чем при увлажнении, что связано со снижением сил межзернового сцепления и изменением свойств контактных поверхностей при насыщении водой. Этот гидромеханический эффект приводит к уменьшению трения и снижению устойчивости породных контактов [12, 13].

#### Расчет энергии разрушения угля в зависимости от его влажности

Рассмотрим модельный расчет на основе теории Мора-Кулона предельного сдвигового напряжения для угольного пласта марки Д с выходом летучих веществ  $\approx 40\%$ , залегающего на глубине около 200 м [14, 15].

При данной глубине нормальное напряжение на потенциальной плоскости скольжения, обусловленное горным давлением, составляет  $\sigma = 5$  МПа [14, 15]. Для сухого угля по результатам лабораторных испытаний принимаем характерные значения сцепления  $c = 0,5$  МПа и угла внутреннего трения  $\varphi = 30^\circ$ , что соответствует диапазонам, приведенным в работах по исследованию механических свойств углей для средней и низшей степени метаморфизма [12, 14]. Тогда предельное сдвиговое напряжение по критерию Мора-Кулона составит:

$$\tau_{\text{сух}} = 0,5 + 5 \cdot \operatorname{tg} 30^\circ \approx 0,5 + 5 \cdot 0,577 \approx 3,39 \text{ МПа.}$$

Если тот же угольный пласт насыщен водой и в результате увлажнения сцепление снижается до  $c = 0,2$  МПа, а угол внутреннего трения – до  $\varphi = 20^\circ$  [9, 10], при том же нормальном напряжении  $\sigma = 5$  МПа получим:

$$\tau_{\text{вл}} = 0,2 + 5 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ \approx 0,2 + 5 \cdot 0,364 \approx 2,02 \text{ МПа.}$$

Сопоставление этих значений показывает, что увлажнение приводит к заметному снижению предельного сдвигового напряжения (с 3,4 до 2,0 МПа), то есть уменьшает устойчивость контактных поверхностей в

угольном массиве и облегчает развитие сдвиговых деформаций и разрушения.

По данным исследований, угол внутреннего трения для слабых горных пород составляет 25–40°, а для прочных – 37–45° [14]. Эти параметры применяются для оценки устойчивости шахтных выработок и определения зон возможного обрушения.

Снижение коэффициента трения и нарушение равновесия в массиве горных пород сопровождаются перераспределением напряжений, что может приводить к локальным деформациям и снижению устойчивости бортов выработок, краевых зон угольных пластов. В этой связи контроль этих параметров является важным направлением геомеханического мониторинга состояния угольных пластов, особенно в зонах повышенного горного давления [15].

Для количественной оценки влияния угла внутреннего трения и состояния породы на ее устойчивость рассмотрим совокупность расчетов по критерию Мора-Кулона и энергетической модели разрушения.

Проведем расчет предельных сдвиговых напряжений для слабых и прочных пород по критерию Мора-Кулона (1). Предположим, что нормальное напряжение на потенциальной плоскости скольжения составляет  $\sigma = 5$  МПа [14], что характерно для условий значительных глубин, а параметры прочности выбираются в соответствии с приведенными выше диапазонами для слабых и прочных пород.

Для слабых пород примем характерное сцепление  $c_{сл} = 0,3$  МПа, а для прочных –  $c_{пр} = 1,0$  МПа, что согласуется с типичными оценками когезии для разупрочненных и консолидированных пород [12, 13, 14].

Для слабых пород примем  $\varphi = 25 - 40^\circ$ .

Для нижней границы диапазона при  $\varphi = 25^\circ$ ,  $\text{tg } 25^\circ \approx 0,466$  рад:

$$\tau_{сл, \min} = c_{сл} + \sigma \text{tg } 25^\circ = 0,3 + 5 \cdot 0,466 = 2,63 \text{ МПа.}$$

Для верхней границы диапазона при  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\text{tg } 40^\circ \approx 0,839$  рад:

$$\tau_{сл, \max} = c_{сл} + \sigma \text{tg } 40^\circ = 0,3 + 5 \cdot 0,839 = 4,50 \text{ МПа.}$$

Итак, для слабых пород  $\tau_{сл} \approx 2,6 - 4,5$  МПа.

Для прочных пород примем значение внутреннего угла трения в диапазоне  $\varphi = 37 - 45^\circ$ .

Для нижней границы диапазона при  $\varphi = 37^\circ$ ,  $\text{tg } 37^\circ \approx 0,754$  рад:

$$\tau_{пр, \min} = c_{пр} + \sigma \text{tg } 37^\circ = 1,0 + 5 \cdot 0,754 = 4,77 \text{ МПа.}$$

Для верхней границы диапазона при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\text{tg } 45^\circ \approx 1$  составит:

$$\tau_{пр, \max} = c_{пр} + \sigma \text{tg } 45^\circ = 1,0 + 5 \cdot 1 = 6,0 \text{ МПа.}$$

Итак, для прочных пород:  $\tau_{сл} \approx 4,8 - 6,0$  МПа.

Сопоставление диапазонов показывает, что при одинаковом уровне нормального напряжения прочные породы допускают значительно более высокие касательные напряжения до перехода в состояние разрушения по сравнению со слабыми породами.

Далее проведем расчет энергии разрушения для сухого и увлажненного угля.

Чтобы связать параметр  $\tau$  с энергетическими характеристиками, рассмотрим модельное сдвиговое испытание угольного образца площадью потенциальной плоскости скольжения  $A = 50 \times 50 \text{ мм} = 2500 \text{ мм}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Перемещения по плоскости сдвига составляют (Рис. 2):

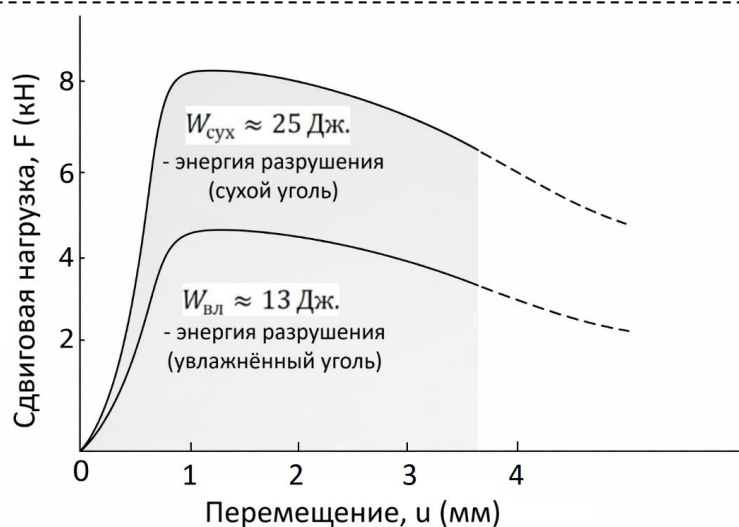


Рис. 2. Кривая «нагрузка–перемещение» с выделенной областью, соответствующей энергии разрушения

Fig. 2. The "load–displacement" curve with the selected area corresponding to the energy of destruction

до пика нагрузки  $u_{\text{пик}} = 1 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  
до завершения разрушения  $u_{\text{кон}} = 4 \text{ мм} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  
постпиковый участок  $\Delta u = u_{\text{кон}} - u_{\text{пик}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Энергия разрушения определяется как работа внешних сил:

$$W = \int_0^{u_{\text{кон}}} F(u) du. \quad (3)$$

В модельных упрощенных расчетах, приведенных ниже, аппроксимируем диаграмму «нагрузка – перемещение» треугольником (до пика) и прямоугольником (после пика) (Рис. 2).

Для сухого угля зададим параметры:

$$c_{\text{сух}} = 0,5 \text{ МПа}, \quad \varphi_{\text{сух}} = 30^\circ \\ \approx 0,577 \text{ рад}, \quad \sigma = 5 \text{ МПа},$$

Проведем расчет предельного сдвигового напряжения.

Подставляем в критерий (2) [12, 13]:

$$\tau_{\text{сух}} = c_{\text{сух}} + \sigma \operatorname{tg} 30^\circ = 0,5 + 5 \cdot 0,577 \\ = 3,385 \text{ МПа} \approx 3,39 \text{ МПа}.$$

Максимальное сдвиговое усилие

$$F_{\text{сух, макс}} = \tau_{\text{сух}} \cdot A = 3,39 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \\ \approx 8,475 \cdot 10^3 \text{ Н} \approx 8,5 \cdot 10^3 \text{ Н} = 8,5 \text{ кН}.$$

Энергия до пика (треугольник)

$$W_{\text{до пик, сух}} = \frac{1}{2} F_{\text{сух, макс}} \cdot u_{\text{пик}} \\ = \frac{1}{2} \cdot 8,475 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ \approx \frac{1}{2} \cdot 8,475 \approx 4,24 \text{ Дж}.$$

Энергия после пика (приближенно прямоугольник).

Постпиковую нагрузку принимаем на уровне  $0,8F_{\text{сух, макс}}$ :

$$0,8F_{\text{сух, макс}} = 0,8 \cdot 8,475 \cdot 10^3 \text{ Н} \approx 6,78 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

Энергия на участке  $\Delta u = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$$W_{\text{после пик, сух}} = 6,78 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ \approx 20,34 \text{ Дж}.$$

Суммарная энергия разрушения сухого угля:

$$W_{\text{сух}} = W_{\text{до пик, сух}} + W_{\text{после пик, сух}} \approx 4,24 + 20,34 \\ \approx 24,58 \text{ Дж} \approx 25 \text{ Дж}.$$

Для увлажненного угля принимаем:

$$c_{\text{вл}} = 0,2 \text{ МПа}, \quad \varphi_{\text{вл}} = 20^\circ \approx 0,364 \text{ рад}, \quad \sigma = 5 \text{ МПа}.$$

Проведем расчет предельного сдвигового напряжения.

Подставляем в критерий (2):

$$\tau_{\text{вл}} = c_{\text{вл}} + \sigma \operatorname{tg} 20^\circ = 0,2 + 5 \cdot 0,364 = 1,82 \text{ МПа}.$$

Максимальное сдвиговое усилие составит

$$F_{\text{вл, макс}} = \tau_{\text{вл}} \cdot A = 1,82 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \\ \approx 4,55 \cdot 10^3 \text{ Н} \approx 4,55 \text{ кН}.$$

Энергия до пика:

$$W_{\text{до пик, вл}} = \frac{1}{2} F_{\text{вл, макс}} u_{\text{пик}} \\ = \frac{1}{2} \cdot 4,55 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ \approx 2,275 \text{ Дж} \approx 2,3 \text{ Дж}.$$

Энергия после пика:

Постпиковую нагрузку примем на уровне  $0,7F_{\text{вл, макс}}$ :

$$0,7F_{\text{вл, макс}} = 0,7 \cdot 4,55 \cdot 10^3 \text{ Н} \approx 3,185 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

Энергия на участке  $\Delta u = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  составит:

$$W_{\text{после пик, вл}} = 3,185 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ \approx 9,555 \text{ Дж} \approx 9,6 \text{ Дж}.$$

Общая суммарная энергия разрушения увлажненного угля составит:

$$W_{\text{вл}} = W_{\text{до пик, вл}} + W_{\text{после пик, вл}} \approx 2,3 + 9,6 \\ \approx 11,9 \text{ Дж} \approx 12 \text{ Дж}.$$

### Результаты

В контексте проведенных расчетов можно сделать выводы:

- полученные величины  $W_{\text{сух}} \approx 25$  и  $W_{\text{вл}} \approx 12$  – это суммарная работа внешних сил;
- до-пиковая часть (рост нагрузки до  $F_{\text{max}}$ ) отражает вклад  $k_{\text{пр}} V$ ;
- постпиковая часть (развитие разрушения при пониженной нагрузке) соответствует  $\alpha_{\text{п}} \Delta S$  (см. форм. 1).

Сопоставление показывает, что:

- при более высоких значениях  $\tau$  (сухой уголь, прочные горные породы) массив способен накопить большой запас энергии  $W$  перед разрушением;
- при разупрочнении (увлажнение, слабые породы) и снижении  $\tau$  уменьшается как уровень предельных напряжений, так и суммарная энергия разрушения, что ведет к более ранней потере устойчивости.

Полученные расчеты и энергетический анализ позволяют количественно оценить влияние трения на механическое поведение угольного массива. Результаты показывают, что предельные касательные напряжения, определяемые по критерию Мора-Кулона, а также энергия разрушения существенно зависят от физических свойств угля и условий залегания.

Для слабых пород предельные значения сдвигового сопротивления составляют  $\tau_{\text{сл}} \approx 2,6 - 4,5 \text{ МПа}$ , тогда как для прочных пород  $\tau_{\text{пр}} \approx 4,8 - 6,0 \text{ МПа}$ . Это подчеркивает более высокую устойчивость уплотненных и консолидированных угольных пластов, способных выдерживать большие касательные нагрузки до перехода в режим разрушения.

Сопоставление параметров трения сухого и увлажненного угля выявляет существенное влияние влажности на устойчивость массива. При переходе от сухого состояния  $\tau_{\text{сух}} \approx 3,39 \text{ МПа}$  к увлажненному  $\tau_{\text{вл}} \approx 1,82 \text{ МПа}$  предельная прочность снижается почти на 40%. Это означает, что зоны повышенной влажности в угольных пластах изначально обладают более низкой способностью сопротивляться сдвигу и являются потенциально уязвимыми элементами массива [15].

Энергетический анализ подтверждает это: суммарная энергия разрушения сухого угля составляет  $W_{\text{сух}} \approx 25$  Дж, тогда как для насыщенного водой угля она уменьшается до  $W_{\text{вл}} \approx 13$  Дж. Разница почти в два раза указывает на то, что увлажненный уголь требует меньшей работы внешних сил для развития трещин, деформаций и срывов.

Сопоставление этих численных характеристик с энергетическим выражением (1) показывает, что уменьшение сцепления и угла внутреннего трения приводит как к снижению объемной энергии деформации  $k_{\text{пр}}V$ , так и к уменьшению энергии, затрачиваемой на образование новых поверхностей  $\alpha_{\text{п}}\Delta S$ . Это отражается и на диаграмме «нагрузка–перемещение». Площадь под кривой для увлажненного угля существенно меньше, чем для сухого, что согласуется с нашими расчетами  $W$ .

Таким образом, количественная оценка напряжений и энергии разрушения показывает, что увлажнение, снижение сцепления и уменьшение угла внутреннего трения являются ключевыми факторами, контролирующими устойчивость угольного массива. Эти параметры влияют на уровень напряжений, при котором происходит переход от упругой деформации к разрушению, определяют потенциал локализации сдвиговых зон и позволяют прогнозировать области возможной потери прочности.

Полученные результаты подтверждают важность учета трибологических и энергетических характеристик угля при анализе устойчивости угольных пластов и интерпретации геомеханических процессов в массиве.

Трение в угольных пластах представляет собой сложный физический процесс, включающий взаимодействие структурных элементов массива, локальную деформацию, перераспределение напряжений и формирование поверхностей разрушения. Рассмотрение трения не как простой силы сопротивления, а как энергетического явления позволяет глубже понять механизмы разрушения и условия потери устойчивости угольных пород [16, 17].

### Выводы

Использование критерия Мора-Кулона для оценки предельных касательных напряжений показало, что прочностные характеристики угля существенно зависят от его структуры, ранга, степени трещиноватости и влажности. Установлено, что слабые породы обладают значительно меньшей несущей способностью по сравнению с прочными, а увлажнение приводит к снижению предельного напряжения сдвига почти на 40%, что делает такие зоны особенно уязвимыми для локализации деформаций и разрушений.

Энергетический анализ разрушения подтвердил, что суммарная работа внешних сил, необходимая для развития трещин, напрямую зависит от состояния угля: энергия разрушения сухого угля почти вдвое превышает энергию разрушения увлажненного. Сопоставление этих данных с энергетическим выражением П.А. Ребиндера показывает, что изменения в сцеплении и угле внутреннего трения приводят к уменьшению объемной энергии деформации и снижению энергии, необходимой для образования новых поверхностей трещин, что ускоряет переход массива в состояние разрушения.

Таким образом, анализ трибологических и энергетических характеристик угольных пластов позволяет количественно оценивать устойчивость массива, выявлять зоны потенциальной нестабильности и более точно прогнозировать развитие деформационных процессов. Интеграция энергетического подхода и критерия Мора-Кулона обеспечивает целостное понимание механизмов разрушения, что делает такие модели важным инструментом при исследовании поведения угольных пластов в условиях естественного напряженного состояния.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экологические аспекты угледобывающей отрасли [Электронный ресурс] // Mining-portal.ru. 2023. URL: <https://www.mining-portal.ru/publish/ekologicheskie-aspektyi-ugledobyivayuschey-otrasli> (дата обращения: 17.11.2025).
2. Шаров Н. А., Дудаев Р. Р., Кришук Д. И., Лискова М. Ю. Методы пылеподавления на угольных разрезах Крайнего Севера [Электронный ресурс] // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2014. № 13. С. 84–96. URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/geo/article/viewFile/1055/536> (дата обращения: 17.11.2025).
3. Полюшкин Н. Г. Основы теории трения, износа и смазки: учеб. пособие. Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т., 2013. 192 с. URL: [https://www.kgau.ru/sveden/2017/mech/metod\\_350306\\_16.pdf](https://www.kgau.ru/sveden/2017/mech/metod_350306_16.pdf) (дата обращения: 17.11.2025).
4. Иванов В. В. Физические основы электромагнитных процессов при формировании очага разрушения в массиве горных пород: дисс. ... д-ра техн. наук. Кемерово, 1994. 336 с.
5. Федорова О. В., Марков В. А. Основы трибологии и триботехники в оборудовании предприятий: учеб. пособие. СПб. : ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. 50 с.
6. Тарасов Б. Г., Дырдин В. В., Иванов В. В., Фокин А. Н. Физический контроль массивов горных пород. Москва : Недра, 1994. 256 с.
7. Zhang Y., Li Z., Li X., Liu Q., Li M. Evolution

of micro-pore structure and mechanical response of coal with different ranks // International Journal of Coal Geology. 2022. Vol. 259. Art. 104147. DOI: 10.1016/j.coal.2022.104147.

8. Li X., Zhao Y., Yuan Z., Zhang B. Mechanical behavior and fracture characteristics of deep coal under high confining pressure // Engineering Fracture Mechanics. 2023. Vol. 286. Art. 109224. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109224.

9. Chen S., Wang H., Li W., Liu X. Influence of moisture on shear and tensile behavior of coal // Fuel. 2023. Vol. 332. Art. 126559. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126559.

10. Wang L., Liu S., Jiang Y. Effect of pore connectivity and moisture adsorption on mechanical degradation of coal // Fuel. 2021. Vol. 286. Art. 119512. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119512.

11. Жабко А. В. Критерии прочности горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). 2021. № 11–1. С. 209–222.

12. Механические свойства горных пород. Глава 3 [Электронный ресурс] // НефтеМагнат. URL: <https://www.neftemagnat.ru/enc/248> (дата обращения: 17.11.2025).

13. Механические свойства горных пород. Прочностные свойства. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/10044734/page:32/> (дата обращения: 08.11.2025).

14. Копытов А. И., Масаев Ю. А., Масаев В. Ю. Исследование влияния физических свойств горных пород на прочностные показатели породных обнажений // Вестник КузГТУ. 2023. № 4 (158). С. 31–38.

15. Гречишкин П. В., Соколов К. В., Трошков Н. Ю. Причины образования и развития структурных дефектов в зонах повышенного горного давления и влияние их на выбросоопасность пласта // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5 (165). С. 108–114.

16. Подземные пожары и самовозгорание угля [Электронный ресурс] // Электронная библиотека Booksite.ru. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/090/325.htm> (дата обращения: 17.11.2025).

17. Шернаев А. Н., Гулямов Г., Разакова Л. С., Мирзакулов Ж. К. Исследование свойств антифрикционных древесно-полимерных композиционных материалов // JMBM. 2022. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svoystv-antifriktsionnyh-drevesno-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov> (дата обращения: 17.11.2025).

© 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:

**Елкин Иван Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: [eis.fiz@kuzstu.ru](mailto:eis.fiz@kuzstu.ru)

**Данилов Павел Андреевич**, студент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: [pashadanilov2006@gmail.com](mailto:pashadanilov2006@gmail.com)

Заявленный вклад авторов:

Елкин Иван Сергеевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, написание текста, выводы.

Данилов Павел Андреевич – проведение расчетов, написание текста, обзор литературы..

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

### INFLUENCE OF HUMIDITY ON MECHANICAL PROPERTIES AND THE ENERGY OF COAL DESTRUCTION

Ivan S. Elkin, Pavel A. Danilov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

\* for correspondence: [eis.fiz@kuzstu.ru](mailto:eis.fiz@kuzstu.ru)

**Article info**

Received:

09 February 2026

Accepted for publication:

01 September 2026

Accepted:

15 September 2026

**Keywords:** coal, humidity, internal friction, fracture energy, tribology, degree of metamorphism, fracturing

**Abstract.**

Attention is paid to tribological phenomena in the coal massif, and a review of studies and bibliographies on the problem of internal friction in the coal massif is given. The results of model calculations are presented. Attention is paid to the influence of geomechanical processes in the coal massif on the state of the environmental situation during mining operations. The above model calculations show a decrease in the energy required to destroy coal by half with an increase in its humidity, as well as the effect of porosity and fracturing on the manifestation of internal friction in the massif. These factors are considered as the main ones that affect the stability of the sides of mining during underground mining of coal seams, as well as the control of the stressed geomechanical state of the coal massif in the marginal part during blowout measures, humidification of coal seams, degassing, which causes the redistribution of accumulated energy in the massif during shifts, collapses and deformations of rocks, part of this energy is spent on heat generation, and part of it is spent on the formation of new crack surfaces. Friction in the thickness of a coal massif is determined by the combination of physical and mechanical properties and geomechanical characteristics of coal, as well as the conditions of its occurrence. The most significant factors influencing shear resistance are local stresses related to the conditions of the formation and fracture mechanisms, as well as the grade of coal, the degree of metamorphism, the depth of the formation and related stresses, as well as porosity, fracturing and moisture level of coal.

**For citation:** Elkin I.S., Danilov P.A. Influence of humidity on mechanical properties and the energy of coal destruction. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):126-134. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-126-134, EDN: RWXQED

## REFERENCES

1. Ecological aspects of the coal mining industry [Electronic resource]. Mining-portal.ru. 2023. URL: <https://www.mining-portal.ru/publish/ekologicheskie-aspektyi-ugledobyivayushey-otrasli>.
2. Sharov N.A., Dudaev P.P., Krishchuk D.I., Liskova M.Y. Methods of dust suppression at coal mines of the Far North [Electronic resource]. *Vestnik PNIPU. Geoiogia. Neftegazove i gornoe delo*. 2014; 13:84-96.
3. Polyushkin N.G. Fundamentals of the theory of friction, wear and lubrication. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2013. 192 p. URL: [https://www.kgau.ru/sveden/2017/mech/metod\\_3\\_50306\\_16.pdf](https://www.kgau.ru/sveden/2017/mech/metod_3_50306_16.pdf).
4. Ivanov V.V. Physical foundations of electromagnetic processes in the formation of a fracture site in a rock mass: diss. ... Doctor of Technical Sciences. Kemerovo, 1994. 336 p.
5. Fedorova O.V., Markov V.A. Fundamentals of tribology and tribotechnics in enterprise equipment: textbook. St. Petersburg: HSE SPbGUPTD; 2024. 50 p.
6. Tarasov B.G., Dyrdin V.V., Ivanov V.V., Fokin A.N. Physical control of rock formations. Moscow: Nedra; 1994. 256 p.
7. Zhang Y., Li Z., Li X., Liu Q., Li M. Evolution of micro-pore structure and mechanical response of coal with different ranks. *International Journal of Coal Geology*. 2022; 259:104147. DOI: 10.1016/j.coal.2022.104147.
8. Li X., Zhao Y., Yuan Z., Zhang B. Mechanical behavior and fracture characteristics of deep coal under high confining pressure. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023; 286:109224. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109224.
9. Chen S., Wang H., Li W., Liu X. Influence of moisture on shear and tensile behavior of coal. *Fuel*. 2023; 332:126559. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126559.
10. Wang L., Liu S., Jiang Y. Effect of pore connectivity and moisture adsorption on mechanical degradation of coal. *Fuel*. 2021; 286:119512. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119512.
11. Zhabko A.V. Criteria of rock strength. *Mining information and Analytical Bulletin (GIAB)*. 2021; 11-1:209-222.
12. Mechanical properties of rocks. Chapter 3 [Electronic resource]. NefteMagnat. URL: <https://www.neftemagnat.ru/enc/248>
13. Mechanical properties of rocks. Strength properties. [Electronic resource]. URL: <https://studfile.net/preview/10044734/page:32/>
14. Kopytov A.I., Masaev Yu.A., Masaev V.Yu. Investigation of the influence of physical properties of rocks on the strength parameters of rock outcrops. *Bulletin of KuzSTU*. 2023; 4(158):31-38.
15. Grechishkin P.V., Sokolov K.V., Troshkov N.Yu. The causes of the formation and development of structural defects in areas of high rock pressure and their effect on the reservoir's explosion hazard. *Bulletin of KuzSTU*. 2024; 5(165):108-114.
16. Underground fires and spontaneous combustion of coal [Electronic resource]. Electronic Library Booksite.ru.

URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/090/325.htm>.

antifriction wood-polymer composite materials. *JMBM*. 2022; 6.

17. Shernaev A.N., Gulyamov G., Razakova L.S., Mirzakulov Zh.K. Investigation of the properties of

© 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 authors:*

**Ivan S. Elkin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: [eis.fiz@kuzstu.ru](mailto:eis.fiz@kuzstu.ru)

**Pavel A. Danilov**, student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: [pashadanilov2006@gmail.com](mailto:pashadanilov2006@gmail.com)

*Contribution of the authors:*

Ivan S. Elkin – formulation of research problems, scientific management, conceptualization of research, writing of text, conclusions.

Pavel A. Danilov – performing calculations, writing a text, reviewing literature.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

