

УДК 622.23.01: 553.061.4: 620.173.24 © Ч.Б. Конгар-Сюрюн<sup>1</sup>,  
Е.С. Сазанкова<sup>2</sup>, М.А. Черевко<sup>3</sup>, А.В. Денгаев<sup>4</sup>, 2025

UDC 622.23.01: 553.061.4: 620.173.24 © Ch.B. Kongar-Syuryun<sup>1</sup>,  
E.S. Sazankova<sup>2</sup>, M.A. Cherevko<sup>3</sup>, A.V. Dengayev<sup>4</sup>, 2025

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
199106, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> ООО «Нефтесервисные решения», г. Санкт-Петербург, 190031, Россия

<sup>4</sup> ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти  
и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», Москва, 119991, Россия

✉ e-mail: kongarsiuiun@gmail.com

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University,  
Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation

<sup>2</sup> National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS),  
Moscow, 119049, Russian Federation

<sup>3</sup> Nefteservisnye Resheniya LLC, Saint Petersburg,  
190031, Russian Federation

<sup>4</sup> Gubkin Russian State University of Oil and Gas,  
Moscow, 119991, Russian Federation

✉ e-mail: kongarsiuiun@gmail.com

# Исследование влияния структурных дефектов на прочность горных пород

## A study of the structural defects impact on the strength of rocks

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-5-114-117>

### КОНГАР-СЮРЮН Ч.Б.

Аспирант кафедры разработки месторождений  
полезных ископаемых, Санкт-Петербургский  
горный университет императрицы Екатерины II,  
199106, г. Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: kongarsiuiun@gmail.com

### САЗАНКОВА Е.С.

Канд. техн. наук, доцент,  
Горный институт НИТУ МИСИС,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: sazankova.es@isis.ru

### ЧЕРЕВКО М.А.

Канд. техн. наук, генеральный директор  
ООО «Нефтесервисные решения»,  
190031, г. Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: Cherevko.MiA@gazprom-neft.ru

### ДЕНЬГАЕВ А.В.

Канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО  
«Российский государственный университет  
нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»,  
119991, г. Москва, Россия,  
e-mail: dengayev.a@gubkin.ru

Обеспечение эксплуатационной надежности горных выработок, охранных целиков и минимизация нарушенности подработанного массива являются основой безопасного ведения горных работ при освоении угольных месторождений. Исследование влияния структурных дефектов на прочность пород является целью исследования. Установлено, что разрушение кристалла проходит ступенчато посредством формирования микроплощадок сдвига и отрыва. Получено уравнение состояния породообразующих минералов с учетом их структуры. Доказано, что формирование объективных законов разрушения горных пород исключает совокупность случайных обстоятельств.

**Ключевые слова:** дефект, горная порода, напряжение, напряженно-деформированное состояние, прочность, разрушение, структура, твердое тело.

**Для цитирования:** Исследование влияния структурных дефектов на прочность горных пород / Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Е.С. Сазанкова, М.А. Черевко и др. // Уголь. 2025;(5):114-117. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-114-117.

### Abstract

Ensuring the functional reliability of mine workings and safety pillars while minimizing the disturbance of the undermined rock mass is the basis for safe coal mining operations. The purpose of this study is to investigate the effects of structural defects on the strength of rocks. It has been established that the crystal failure proceeds stepwise through the formation of the shear and detachment microzones. An equation of the rock-forming minerals state has been obtained with account of their structure. It is proved that formation of objective laws of rock failure excludes the combination of random circumstances.

**Keywords**

Defect, rock, stress, stress-and-strain state, strength, failure, structure, solid body.

**For citation**

Kongar-Syuryun Ch.B., Szankova E.S., Cherevko M.A., Dengaev A.V. A study of the structural defects impact on the strength of rocks. *Ugol'*. 2025;(5):114-117. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-114-117.

**ВВЕДЕНИЕ**

Освоение недр является источником повышенной опасности [1]. За последние 50 лет возникло множество техногенных катастроф, приведших к гибели рудника и потере части запасов месторождения [2]. Частота катастроф увеличивается [3].

Минимизация деформационных изменений подработанного массива, исключение деградационных изменений дневной поверхности, сохранение водозащитной толщи, поддержание устойчивости горных выработок – это лишь неполный список ключевых вопросов, решаемых при извлечении полезных ископаемых подземным способом [4]. Достаточно сложно дело обстоит с ведением очистных работ: обрушение пород в выработанном пространстве и разрушение охранных целиков приводят к прогибу налегающих толщ, формированию зон сдвижения [5].

Все расчеты надежности породного массива базируются на оценках практической значимости научных разработок [6]. Подход к решению данной задачи, исключающий взаимосвязь концентрации напряжений раскалывания пород с их структурой и систематизацию этих данных («бесструктурный» подход) приводит к установлению эмпирических зависимостей, что зачастую вызывает ошибочное суждение [7].

Исследование физической сущности процессов разрушения породного массива и угля, их детальный анализ и разработка новых теоретических и технико-технологических решений позволят справиться с существующей проблемой [8].

Исходя из изложенного выше, исследование устойчивости горных выработок и определение влияния на нее прочностных и структурных характеристик вмещающих пород с учетом естественных дефектов и нарушений, возникающих в ходе эксплуатации месторождения (концентраторами механических напряжений), являются весьма актуальной задачей.

**МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ**

Поведение твердого тела под нагрузкой регулируется силами притяжения и отталкивания составных частей, т.е. атомов А и В, периодически распределенных в структуре [9].

Прочность твердого тела снижается не только от уменьшения рабочего сечения образца, но и от искажения структуры в нем. Образец под нагрузкой можно представить элементом конструкции, ослабленной множеством отверстий, около которых возникает зона концентрации напряжений [10]. В результате искажения сило-

вого потока на крайние связи может приходиться нагрузка, в несколько раз превосходящая среднее значение [11].

Ранее проведенными исследованиями установлено, что прочность горных пород зависит от статистического распределения дефектов  $k$ , линейного коэффициента упругости  $\beta$ , ангармоничности  $\gamma$  среднего межатомного расстояния  $r_0$ , формы нарушения сплошности  $k_3$ , коэффициента концентрации напряжений  $a_0$ , размеров области концентрации, коэффициента  $K_p$ .

$$\sigma = \sigma / a_k = \frac{K_1 \beta^2}{4 \gamma r_0^2} \left[ \frac{1 - K_3 K_p^{2/3}}{1 + (a_0 - 1) K_3 K_4^2 K_p^{2/3}} \right] \quad (1)$$

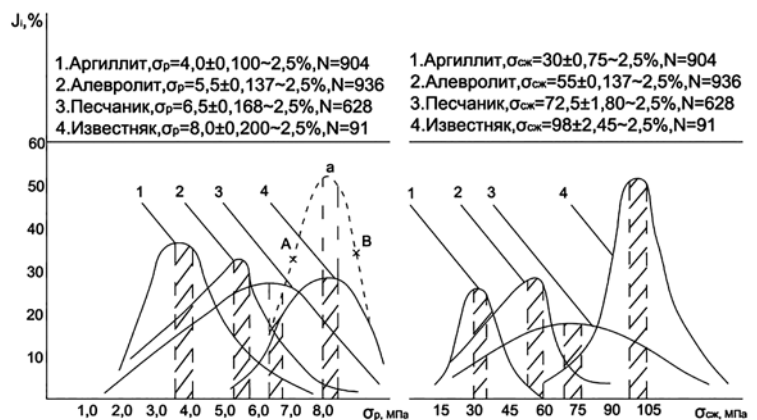
Однако эта формула не реализуется полностью на практике для целого ряда твердых тел по причине отсутствия в ней оценок линейных и точечных дефектов, вносящих свой вклад в конечный результат разрушения [12].

Истину можно установить путем сравнения совершенного (идеального) и реального твердых тел [5]. Различные методы сравнения на примере имитационной модели описывались в работе [13].

Реальный кристалл отличается от этой идеальной схемы наличием дефектов структуры, которые сильно изменяют его свойства. Наиболее существенные типы дефектов проанализированы и классифицированы в работе [14]. Исходя из отклонений от правильной, бесконечной кристаллической структуры типы дефектов подразделяются: дефекты нарушения порядка (точечные, дислокационные, граничные) и дефекты химического порядка (примеси, преципитаты).

Ранее проведенными исследованиями установлено [15], что разрушение твердого тела происходит посредством формирования микрощапок сдвига и отрыва. Данные микрощапки связаны с генетическими слоями роста кристаллов, представляющих собой эпитаксиальные пленки кристаллизации вещества.

В поликристаллических породах картина разрушения образцов сложная из-за неодинакового поглощения энергии разрушения на границах зерен, хотя также появляются



Эмпирические вероятности распределения горных пород Донбасса по прочностным характеристикам  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$   
 Empirical probabilities of the Donbass rocks distribution by the  $\sigma_p$  and strength characteristics  $\sigma_{сж}$

ступени, далекие по своим размерам от элементарных. Это можно рассмотреть как нелинейную систему. Как правило, это пакеты пластин, соответствующих различного зернам. По форме ступени отвечают формам границ. Разрушение зерен – явление редкое. Количественную оценку при этом сделать затруднительно из-за ограничений по анизотропии и дискретности структуры. Вероятнее всего, здесь могут сыграть роль не локальные напряжения, а характеристики эмпирического распределения горных пород в функции напряжений  $\sigma_{\text{н}}$  и  $\sigma_{\text{сж}}$ .

На рисунке представлены вероятности распределения исследуемых образцов горных пород по прочностным характеристикам на сжатие и растяжение, которые свидетельствуют как о различиях отдельных пород между собой, так и о разнотипности их разрушений.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Формализация структурных признаков связи с концентрацией напряжений раскалывания и теоретической прочностью твердых тел позволяет лучшим образом оценить влияние структурных дефектов на прочность горных пород.

С целью обобщения структурных и прочностных признаков при разрушении твердых тел предлагается их формализация в виде:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{\text{раск}}}{K_1 \left[ \left( \frac{1-1,2K_p^{2/3}}{1+9,6K_p^{2/3}} \right) \right]} \tag{2}$$

где  $K_1 = f_p \left( r_0, N, H, K_p^{2/3} \right)$  – показатель разрушения твердого тела с образованием микроступеней скола. Уравнение состояния (равновесия, соответствия) твердого тела получено методом интеграции и имеет вид:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{\text{раск}}}{5,370 f_p c^2} \tag{3}$$

где  $c = (1 - r_0^2 N) \left[ \frac{(1-1,2H)}{(1+9,6H)} \right] \left[ \frac{(1-1,2K_p^{2/3})}{(1+9,6K_p^{2/3})} \right]$  – степень раз-

рушения твердого тела, определяется с учетом количества нарушений и их среднего размера сетки.

Вычисления значений  $f_p$  (функция распределения элементов сдвига) каждого образца с учетом  $S, H, \sum_1^{m+n} L_{ij}$  и

других величин показали, что усредненное экспериментальное значение  $\sigma_{\text{раск}} = 2,324$  МПа отличается от вычисленного, отсюда возникает показатель компенсации  $K_k$ .

Предварительно определенное опытное значение модуля каменной соли  $E = 3,61 \cdot 10$  МПа. С учетом того, что коэффициенты концентрации напряжении раскалывании образцов в  $k$  раз больше коэффициентов концентрации напряжений растяжения, то есть  $\sigma_{\text{раск}} \cdot k = \sigma_{\text{раст}}$ , а численное значение  $\sigma_{\text{теор}}$  должно соответствовать «чистому растяжению», уравнение состояния можно представить следующим образом:

$$\sigma_{\text{теор}} = \sigma_{\text{раст}} \cdot [1/(x + \lambda)]^3 c, \tag{4}$$

где  $c = (1 - r_0^2 N) \left[ \frac{(1-1,2H)}{(1+9,6H)} \right] \left[ \frac{(1-1,2K_p^{2/3})}{(1+9,6K_p^{2/3})} \right]$  \tag{5} – степень

разрушения структуры материала. В свернутом виде формула (4) запишется как:  $f_p = \sigma_{\text{раст}} / \sigma_{\text{теор}} \cdot c$ .

Фактически она характеризует обобщенный критерий разрушения твердых тел с учетом их структуры.

Полученное уравнение (4) состояния твердого тела нетрудно привести к модификации, отвечающей, например, состоянию  $K_p = 0, H = 0$ . С практической точки зрения имеет значение модификация, когда  $r^2 N = 0$ , а формула принимает вид:

$$\sigma_{\text{теор}} = \sigma_{\text{раст}} \cdot \left[ f_p \cdot \left[ \frac{(1-1,2H)}{(1+9,6H)} \right] \left[ \frac{(1-1,2K_p^{2/3})}{(1+9,6K_p^{2/3})} \right] \right]^{-1} \tag{6}$$

С коэффициентом компенсации 5,3670 и  $\sigma_{\text{раск}}$  вместо  $\sigma_{\text{раст}}$  формула позволяет облегчить проведение испытаний образцов и определить  $\sigma_{\text{теор}}$ , а следовательно, и  $E$  путем их раскалывания вместо растяжения. В представленном виде формула (6) учитывает точечные дефекты и другие особенности эксперимента этим коэффициентом:

$$\sigma_{\text{теор}} = \sigma_{\text{раск}} \cdot \left[ \frac{5,3670}{(x + \lambda)^3} \right] \left[ \frac{(1-1,2H)}{(1+9,6H)} \right] \left[ \frac{(1-1,2K_p^{2/3})}{(1+9,6K_p^{2/3})} \right] \tag{7}$$

Таким образом, на основе экспериментальной и теоретической оценки прочности твердого тела получено уравнение состояния порообразующих минералов с учетом их структуры. Уравнение состояния в свернутом виде представляет собой обобщенный критерий разрушения твердого тела с учетом его структуры. Раскалывание образцов встречными клиньями можно представить не только как метод оценки физико-механических свойств, но и как энергетическую оценку состояния твердого тела.

**ВЫВОДЫ**

В статье представлены исследования влияния структуры дефектов на прочность пород на примере каменной соли.

На основе экспериментальной и теоретической оценки прочности твердого тела получено уравнение состояния порообразующих минералов с учетом их структуры. Уравнение состояния в свернутом виде представляет собой обобщенный критерий разрушения твердого тела с учетом его структуры.

Раскалывание образцов встречными клиньями можно представить не только как метод оценки физико-механических свойств, но и как энергетическую оценку состояния твердого тела.

## Список литературы • References

- Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М., Горелкина Е.И. Классификация георесурсов в парадигме их комплексного освоения // Горная промышленность. 2024;(6):140-143. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-140-143>.  
Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.M., Gorelkina E.I. Increasing Classification of georesources in the paradigm of their integrated development. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):140-143. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-140-143>.
- Nikitin V.I., Nechaeva O.A., Zhivaeva V.V. Software for calculating the volume of drilling fluid filtrate penetrating into the reservoir during well completion. *Oil Industry*. 2022;(8):126-128. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-8-126-128.
- Babyr N.V. Topical Themes and New Trends in Mining Industry: Scientometric Analysis and Research Visualization. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2024;37(2):439-451. DOI: 10.5829/ije.2024.37.02b.18.
- Nikitin V.I., Nechaeva O.A., Mozgovoy G.S. Analysis of the results of the experiment to determine the saturation of the filtrate of drilling fluid of the core sample. AIP Conf. Proc. 29 October 2021;2410(1):020014. <https://doi.org/10.1063/5.0067566>.
- Моделирование реологических процессов деформирования несущих элементов камерной системы разработки для условий Верхнекамского месторождения калийных солей / Е.Р. Ковальский, Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Ю.Г. Сиренко и др. // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 3. С. 1017-1030. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1017-1030.  
Kovalskiy E.R., Kongar-Syuryun Ch.B., Sirenko Yu.G., Mironov N.A. Modeling of rheological deformation processes for room and pillar mining at the Verkhnekamsk potash salt deposit. *Ustojchivoe razvitie gornykh territorij*. 2024;16(3):1017-1030. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1017-1030>.
- Nikitin V.I., Agrelkina M.M. Justification for the Selection of a Relative Permeability Model in the Task of Predicting Drilling Fluid Filtrate Invasion into the Formation. *International Journal of Engineering*. 2025;38(10): 2312-2320. DOI: 10.5829/ije.2025.38.10a.08.
- Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Создание закладочного композита на основе отходов угольной промышленности // Уголь. 2024;(10):24-27. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-24-27.  
Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.M. Creation of a backfill composite based on coal industry waste. *Ugol'*. 2024;(10):24-27. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-24-27.
- Pshenin V.V. Determination of Parameters of Rational Placement of Oil and Petroleum Product Vapor Recovery Unit. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025;38(2):362-367. DOI: 10.5829/ije.2025.38.02b.10.
- Конгар-Сюрюн Ч.Б. Влияние шахтной воды на прочностные характеристики искусственного массива, созданного на основе техногенных отходов // Уголь. 2024;(12):75-78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78.  
Kongar-Syuryun Ch.B. Influence of mine water on the strength of artificial mass based on industrial waste. *Ugol'*. 2024;(12):75-78. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78.
- Maksarov V.V., Minin A.O., Vasilkov D.V. The use of high-frequency wave action as part of the process to ensure the quality of boring surfaces in products made of corrosion-resistant aluminum alloys. *Tsvetnyye Metally*. 2025;(1):76-83. <https://doi.org/10.17580/tsm.2025.01.11>.
- Клементьева И. Н., Кузиев Д. А. Выемочно-погрузочный драглайн с ковшом инновационной конструкции // Гонный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019(7):149-157. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-149-157.  
Klementyeva I.N., Kuziev D.A. Extracting-and-loading dragline with innovative design bucket. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(7): 149-157. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-149-157.
- Nikitin V.I., Zhivaeva V.V., Mozgovoy G.S. Calculation of Saturation and Depth of Filtrate Penetration in the Primary Opening. *Proceedings of the International Conference Engineering Innovations and Sustainable Development*. Cham: Springer. 2022;210. DOI: 10.1007/978-3-030-90843-0-30.
- К проблеме минимизации объемов мобильной пыли при разработке карьеров / В.И. Голик, З.А. Гашимова, М.Ю. Лискова и др. // Безопасность труда в промышленности. 2021;(11):28-33. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33.  
Golik V.I., Gashimova Z.A., Liskova M.Yu., Kongar-Syuryun Ch.B. To the problem of minimizing the volume of mobile dust in the development of pits. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2021;(11):28-33. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33.
- Korshak A.A., Pshenin V.V. Modeling of Water Slug Removal from Oil Pipelines by Methods of Computational Fluid Dynamics. *Oil Industry*. 2023:117-122. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-10-117-122.
- Алиева Л., Жуков И.А. Повышение эффективности ударно-поворотного бурения горных пород высокой крепости совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 4. С. 1681-1694. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1681-1694.  
Alieva L., Zhukov I.A. Upgrading rotary-percussion drilling of high-strength rocks by improving the structure of a rock-crushing blade-free tool. *Ustojchivoe razvitie gornykh territorij*. 2024;16(4):1681-1694. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694>.

## Authors Information

**Kongar-Syuryun Ch.B.** – Postgraduate Student of the Mining Department, Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation, e-mail: kongarsiuiun@gmail.com

**Sazankova E.S.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: sazankova.es@misis.ru

**Cherevko M.A.** – PhD (Engineering), General Director, Nefteservisnye Resheniya LLC, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation, e-mail: Cherevko.MiA@gazprom-neft.ru

**Dengaev A.V.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: dengaeav.a@gubkin.ru

## Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.03.2025

Поступила после рецензирования: 16.04.2025

Принята к публикации: 26.04.2025

## Paper info

Received March 14, 2025

Reviewed April 16, 2025

Accepted April 26, 2025