

УДК 622.271.452 © У.Ф. Насиров¹, Ш.Ш. Заиров¹, В.Ф. Демин²,
Д.Р. Ахматнуров², Р.А. Мусин², 2026

UDC 622.271.452 © U.F. Nasirov¹, Sh.Sh. Zairov¹, V.F. Demin²,
D.R. Akhmatnurov², R.A. Musin², 2026

¹ Алмалыкский филиал НИТУ МИСИС,
110100, г. Алмалык, Республика Узбекистан

¹ Almalyk Branch of National Research University of Science
and Technology (MISIS), Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan

² НАО «Карагандинский технический университет
имени Абылкаса Сагинова», 100027, г. Караганда, Республика Казахстан
✉ e-mail: vladfdemin@mail.ru

² A. Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan
✉ e-mail: vladfdemin@mail.ru

Исследование рациональных параметров карьерных откосов с учетом напряженного состояния

Research into rational parameters of open-pit slopes with account of the stress state

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-4-101-105>

В статье рассматриваются вопросы исследования рациональных параметров откосов карьерных бортов с учетом их напряженно-деформированного состояния. Особое внимание уделено анализу факторов, влияющих на устойчивость откосов при разработке глубоких карьеров: геологическим и гидрогеологическим условиям, физико-механическим свойствам горных пород, динамическим нагрузкам от горнотранспортного оборудования и буровзрывных работ. На основе методов геомеханического моделирования и расчетов коэффициента устойчивости определены оптимальные углы откосов, обеспечивающие безопасную эксплуатацию и эффективное использование минерально-сырьевой базы. Полученные результаты могут служить научным обоснованием при проектировании карьеров и разработке мероприятий по повышению устойчивости и надежности бортов в условиях сложных горно-геологических факторов.

Ключевые слова: Карьер, борт, уступ, устойчивость, откос, коэффициент запаса устойчивости, коэффициент бокового распора.

Для цитирования: Исследование рациональных параметров карьерных откосов с учетом напряженного состояния / У.Ф. Насиров, Ш.Ш. Заиров, В.Ф. Демин и др. // Уголь. 2026;(4):101-105. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-4-101-105.

Abstract

The article discusses issues related to studying rational parameters of open-pit slopes with account of their stress-and-strain state. Particular attention is paid to analyzing the factors that affect the stability of slopes during the development of deep open-pit mines, i.e. geological and hydrogeological conditions, physical

НАСИРОВ У.Ф.

Доктор техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе и инновациям, Алмалыкский филиал НИТУ МИСИС, 110100, г. Алмалык, Республика Узбекистан

ЗАИРОВ Ш.Ш.

Доктор техн. наук, профессор кафедры Горное дело Алмалыкского филиала НИТУ МИСИС, 110100, г. Алмалык, Республика Узбекистан

ДЕМИН В.Ф.

Доктор техн. наук, профессор кафедры Разработка месторождений полезных ископаемых, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», 100027, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: vladfdemin@mail.ru

АХМАТНУРОВ Д.Р.

Заведующий лабораторией Метановой энергетики, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», 100027, г. Караганда, Республика Казахстан, e-mail: d.akhmatnurov@gmail.com

МУСИН Р.А.

Доцент кафедры Разработка месторождений полезных ископаемых, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», 100027, г. Караганда, Республика Казахстан e-mail: R.A.Mussin@mail.ru

and mechanical properties of rocks, dynamic loads from mining transport equipment and drilling and blasting operations. The optimal slope angles are determined based on geomechanical modeling methods and safety factor calculations to ensure safe operation and efficient use of mineral resources. The results obtained can serve as a scientific basis for designing open-pit mines and developing measures to increase the stability and safety of slopes in complex mining and geological conditions.

Keywords

Open-pit mine, slope, bench, stability, slope angle, safety factor, horizontal stress factor.

For citation

Nasirov U.F., Zairov Sh.Sh., Demin V.F., Akhmaturov D.R., Musin R.A. Research into rational parameters of open-pit slopes with account of the stress state. *Ugol*. 2026;(4):101-105. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-4-101-105.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день уже разработаны усовершенствованные методы расчета, позволяющие учитывать полное трехмерное напряженное состояние массива. Один из таких подходов предназначен для оценки устойчивости откосов, сложенных как однородными (квазиизотропными), так и слоистыми породами с поверхностями скольжения, пересекающими слоевые контакты [1, 2, 3]. Данный метод учитывает исходное напряженное состояние породного массива и предполагает использование коэффициента бокового распора (μ). В основу положено общее решение двумерной (плоской) задачи об устойчивости откосов.

Следует отметить, что традиционные расчеты устойчивости откосов, используемые ранее, не учитывали коэффициент бокового распора и коэффициент Пуассона, так как эти характеристики не были задействованы в расчетных формулах. В то же время проведенные исследования показывают, что применение новой методики приводит к увеличению получаемого коэффициента устойчивости (K) на 10-35% по сравнению с традиционными расчетами при углах наклона откосов от 20 до 60°. Это позволяет увеличить проектируемые углы откосов однородных и слоистых массивов без изменения нормативного коэффициента устойчивости.

МЕТОДЫ

Методика расчета устойчивости карьерных откосов подробно изложена в методических указаниях для однородных и слоистых массивов [4, 5, 6]. Данная методика учитывает начальное напряженно-деформированное состояние массива горных пород, распределение напряжений в приоткосных зонах, коэффициент бокового распора (μ), а также модули упругости различных слоев массива.

Основные положения методических указаний можно кратко представить следующим образом:

Для проведения расчетов устойчивости откосов из однородных и неоднородных (слоистых) пород необходимо точно определить расчетные характеристики массива горных пород и нормативные коэффициенты устойчивости.

В качестве исходной характеристики прочности горных пород используется так называемый паспорт прочности,

представляющий собой графическое отображение предельных состояний по критерию прочности Мора (огибающая предельных кругов Мора). Этот паспорт строится в координатах нормальных (σ_n) и касательных (τ_n) напряжений и позволяет определять предельные параметры пород: сцепление (c), угол внутреннего трения (φ), а также сопротивление пород сжатию, растяжению и сдвигу.

Для определения расчетных величин плотности, сцепления и угла внутреннего трения могут использоваться данные, приведенные в обширных справочных источниках и литературе, или рекомендации ВНИМИ. Угол внутреннего трения массива обычно принимается равным углу внутреннего трения, полученному для лабораторного образца породы, за исключением случая, когда оценка проводится по явным поверхностям ослабления (тогда учитываются особые условия). В свою очередь, значение сцепления в массиве горных пород корректируется с учетом ряда факторов и рассчитывается по соответствующим эмпирическим формулам.

Расчетная величина сцепления пород в массиве существенно зависит от ряда факторов, среди которых выделяются степень трещиноватости, выветренность пород, степень их тектонического нарушения, наличие заполнителей трещин (глинистых и других слабых прослоев), обводненность, а также масштабный эффект. В связи с этим сцепление в массиве рассчитывают не по лабораторным испытаниям образцов напрямую, а по специальной формуле, учитывающей указанные факторы и позволяющей с высокой степенью достоверности определить его действительное значение в горном массиве.

$$C_m = \frac{C - C^i}{1 + a \ln(hw)} + C^i, \tag{1}$$

где C – сцепление пород в образце; C^i – сцепление по поверхности ослабления (тектонические трещины, контакты слоев пород и пр.); w – средняя интенсивность трещиноватости соответствующего участка массива горных пород; a – коэффициент, зависящий от прочности пород в образце, степени и характера трещиноватости.

Для песчано-глинистых трещиноватых пород, имеющих сцепление в монолите меньше $3,92 \cdot 10^5$ Па, зависимость между сцеплением в массиве и образце имеет вид:

$$C_m = \lambda^1 C, \tag{2}$$

где λ^1 – коэффициент структурного ослабления, который для слабых песчано-глинистых пород изменяется от 0,3 до 0,8.

Согласно общепринятой теории, под коэффициентом бокового распора (μ) понимается безразмерный коэффициент, характеризующий пропорциональное соотношение между горизонтальной и вертикальной компонентами напряжений горного давления в ненарушенном горном массиве. Значение этого коэффициента зависит от комплекса свойств горных пород, включая коэффициент Пуассона, прочностные и реологические характеристики, а также от уровня и характера тектонических напряжений.

Для получения наиболее точных расчетных значений коэффициента бокового распора целесообразно использовать непосредственные натурные измерения горизон-

тальных и вертикальных напряжений, проводимые в нарушенном массиве горных пород. При невозможности выполнения таких измерений на практике применяют альтернативный подход – так называемый «метод обратных расчетов», когда искомые параметры напряженного состояния определяются по косвенным признакам на основе анализа наблюдаемых деформаций или устойчивости откосов и уступов.

Если же натурные измерения или обратные расчеты выполнить затруднительно, то расчет коэффициента бокового распора проводят по эмпирической формуле Динника, основанной на зависимости от коэффициента Пуассона породы, при условии отсутствия существенного влияния тектонических напряжений [7, 8, 9].

Использование приведенных ориентировочных значений коэффициента бокового распора (μ) позволяет обеспечить необходимую точность и надежность инженерных расчетов устойчивости карьерных откосов и облегчает планирование горнотехнических мероприятий в случаях, когда отсутствуют возможности для проведения прямых натурных измерений.

Для различных типов горных пород и грунтов характерны следующие ориентировочные значения коэффициента бокового распора (μ):

- скальные породы при различной интенсивности трещиноватости: $\mu = 0,23-0,43$;
- прочные песчаники: $\mu \approx 0,33$;
- породы алевролитового типа: $\mu = 0,6-0,7$;
- песчаные грунты: $\mu \approx 0,42$;
- супеси: $\mu \approx 0,55$;
- суглинки: $\mu \approx 0,65$;
- глинистые грунты: $\mu = 0,75-0,80$.

Важно отметить, что согласно нижеприведенным формулам (3) и (4) коэффициент устойчивости K при прочих равных условиях возрастает с увеличением коэффициента бокового распора μ . Вместе с тем следует учитывать, что физико-механические свойства горных пород и грунтов связаны между собой определенными зависимостями. На практике породы с низким коэффициентом бокового

распора (соответствующие меньшему коэффициенту Пуассона) характеризуются, как правило, высокими значениями сцепления и параметров внутреннего трения, то есть обладают большим значением обобщенного параметра устойчивости λ . В результате именно эти породы обеспечивают в реальных условиях большую устойчивость откосов, несмотря на формальное снижение коэффициента бокового распора.

Например, для откосов, сложенных как однородными, так и слоистыми породами, при пересечении поверхности разрушения контактами слоев, при увеличении коэффициента бокового распора от $\mu = 0,25$ (характерного для скальных пород) до $\mu = 0,75$ (для глинистых пород), коэффициент устойчивости K при прочих равных условиях увеличивается примерно на 30%. Однако если учесть, что сцепление и тангенс угла внутреннего трения у скальных пород могут быть в три раза выше, чем у глинистых, реальный коэффициент устойчивости скальных пород будет практически вдвое превышать аналогичный показатель для глинистых пород [10, 11, 12].

Выбор расчетных величин коэффициента устойчивости K имеет большое значение при определении рациональных параметров горных выработок и отвалов и может быть осуществлен по методике ВНИМИ. Однако данная методика не учитывает влияние коэффициента бокового распора на состояние устойчивости откосов.

Коэффициенты устойчивости однородных откосов с учетом изменения коэффициента бокового распора μ от 0,1 до 1 определяются формулами [13]:

при $\lambda \geq 0,1$

$$K = \frac{4}{7}(1 + \mu)(a\lambda + b)ctq\rho; \quad (3)$$

при $0 < \lambda < 0,1$

$$K = \frac{4}{7}(1 + \mu)\sqrt{(10\lambda(d^2 - ctq^2\beta) + ctq^2\beta)ctq\rho}. \quad (4)$$

Здесь параметр устойчивости:

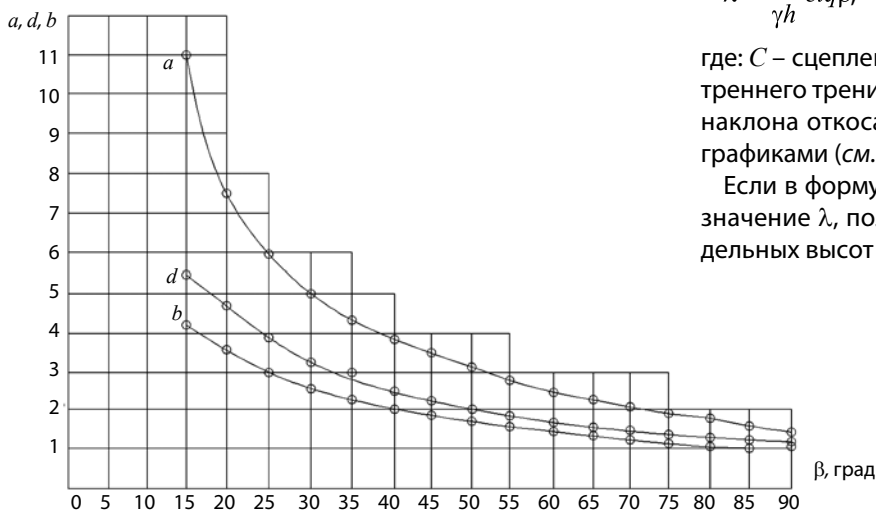
$$\lambda = \frac{2C}{\gamma h}ctq\rho, \quad (5)$$

где: C – сцепление в массиве горных пород; ρ – угол внутреннего трения; γ – плотность пород; h – высота; β – угол наклона откоса; a, b, d – коэффициенты, определяемые графиками (см. рисунок).

Если в формулах (3) и (4) положить $K = 1$ и подставить значение λ , получим выражения для определения предельных высот откосов:

$$h_{np} = \frac{2ac}{\gamma \left(\frac{1,75}{1 + \mu} - \beta tq\rho \right)}; \quad (6)$$

$$h_{np} = \frac{20cctq\rho(d^2 - ctq^2\beta)}{\gamma \left(\frac{49ctq^{2\rho}}{16(1 + \mu)^2} \right)} - ctq^2\beta. \quad (7)$$



Зависимость коэффициентов a, d, b от угла откоса β
Dependence of coefficients a, d, b on slope angle β

Предельную высоту карьерного откоса рекомендуется определять по

формулам (6) и (7). При этом следует вычислять обе формулы и выбирать для практических целей наименьшее из полученных значений. Если в расчетах окажется, что угол внутреннего трения пород ρ больше или равен углу наклона откоса β (то есть $\rho \geq \beta$) либо расчетное значение предельной высоты h_{np} получается отрицательным ($h_{np} < 0$), то такой откос устойчив при любой, даже самой большой высоте.

Если же необходимо определить высоту откоса (h_{κ}) для заранее заданного значения коэффициента устойчивости K , то следует внести следующие корректировки в исходные формулы:

В формуле (6) вместо коэффициента 1,75 следует подставить произведение $1,75 \cdot K$.

В формуле (7) вместо выражения $49 \cdot ctg^2 \rho$ необходимо использовать $49 \cdot K^2 \cdot ctg^2 \rho$.

В ситуациях, когда поставлена задача найти угол устойчивого откоса β при уже заданной его высоте и известном нормативном коэффициенте устойчивости K , рекомендуется следующий порядок действий:

- рассчитать коэффициенты устойчивости (K) для нескольких вариантов углов откоса (β);
- построить график зависимости коэффициента устойчивости K от угла откоса β ;
- по построенному графику определить угол откоса β , соответствующий заданному значению коэффициента устойчивости K .

При наличии данных об уже произошедших обрушениях, когда известны предельный угол β_{np} и высота откоса h_{np} в момент разрушения, появляется возможность определить фактическое значение коэффициента бокового распора пород, сложивших откос. Для этого в расчетных формулах (3), (4) коэффициент устойчивости принимается равным единице ($K = 1$). Тогда коэффициент бокового распора вычисляется по следующей формуле:

при $0 < \lambda < 0,1$

$$\mu = \frac{1,75ctq\rho}{a\gamma + b} - 1, \quad (8)$$

где μ – выражение для расчета коэффициента бокового распора на основании известных β_{np} и h_{np} .

Данный подход позволяет наиболее точно учитывать реальные инженерно-геологические условия массива и обеспечивает повышение достоверности прогнозирования устойчивости карьерных откосов:

при $\lambda \geq 0,1$

$$\mu = \frac{1,75ctq\rho}{\sqrt{10\lambda_{np}(d^2 - ctg\beta_{np}) + ctg^2\beta_{np}}} - 1. \quad (9)$$

Величина λ_{np} определяется формулой (3) при $h_{np} = h$.

Полученное значение коэффициента бокового распора (μ) необходимо применять в расчетах, связанных с определением устойчивых углов откосов и разработкой соответствующих инженерных мероприятий для повышения их устойчивости.

Важным фактором при расчете устойчивости карьерных выработок и отвалов является расположение плоскостей симметрии, если такие существуют. Для открытых

горных выработок плоскости симметрии, как правило, проходят через подошву карьера. В случае же отвалов эти плоскости обычно пересекают непосредственно тело отвала. На поверхностях симметрии касательные напряжения всегда равны нулю, что приводит к различиям в распределении напряжений в приоткосных зонах карьерных выработок и отвалов, возникающих под действием собственного веса пород.

Однако выполненные сравнительные расчеты показали, что, несмотря на указанные различия в напряженном состоянии, коэффициенты устойчивости для откосов карьеров и отвалов при прочих равных условиях практически не отличаются. Следовательно, для определения рациональных параметров карьерных откосов и отвалов могут применяться одни и те же расчетные формулы (3)-(9) [14].

Кроме того, если при расчетах устойчивости карьерных уступов не учитывать взаимного влияния уступов друг на друга и на общий контур карьера, указанные формулы также могут успешно использоваться для определения рациональных и безопасных параметров отдельных уступов. Это позволяет значительно упростить и ускорить расчеты устойчивости в инженерной практике, сохранив при этом достаточную точность и надежность получаемых результатов.

При выполнении расчетов рациональных параметров откосов, сложенных неоднородными породами, применяются формулы (3)-(9). В этом случае необходимо использовать усредненные характеристики физико-механических свойств пород (сцепление, тангенс угла внутреннего трения, плотность, коэффициент бокового распора и т.д.), вычисляемые методом взвешенного среднего по длине потенциальной поверхности разрушения согласно формуле:

$$a_{cp} = \frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i}, \quad (10)$$

где: a_i – значение характеристики породы (например, сцепление, угол внутреннего трения, плотность или коэффициент бокового распора) для каждого отдельного слоя; S_i – длина участка наиболее вероятной поверхности разрушения, проходящего через этот слой.

Для получения значений S_i требуется предварительно построить предполагаемую поверхность разрушения. Примерное построение такой поверхности для диапазона углов наклона откосов $15^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$, в случае, когда поверхность разрушения не совпадает с контактами слоев (см. рисунок).

Использование описанного выше алгоритма позволяет корректно и наглядно учитывать неоднородность породных слоев, через которые проходит потенциальная поверхность скольжения, что существенно повышает надежность и точность расчетов устойчивости карьерных откосов.

$$l = \frac{l^*}{18} (20\mu + 3); \quad (11)$$

$$\beta^* = 0,2\beta + 20^\circ \quad (12)$$

Следует подчеркнуть, что возможные погрешности при определении коэффициента устойчивости откосов, воз-

никающие из-за приближенного построения наиболее вероятной поверхности разрушения, оказываются крайне незначительными. Это обусловлено специфическим распределением напряжений вблизи подошвы выработки, в результате чего формируется так называемая «равно ослабленная зона» в приоткосном массиве. В этой зоне различия между значениями коэффициента устойчивости K , рассчитанными для различных траекторий поверхности разрушения, построенных в описанном выше исследовании, составляют не более 3%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование циссоидной формы откосов и программного обеспечения, реализующего современные геомеханические модели, дает возможность значительно повысить экономическую и технологическую эффективность открытых горных работ за счет рационализации проектируемых параметров откосов и существенного снижения объемов вскрыши.

Список литературы • References

- Lappalainen P., Pitkajarvi J. Dilution control at Outokumpu mines. *Procc. Nickel 96. Kalgoorlie*, 1996. P. 25-29.
- Parker H.M. Reconciliation principles for the mining industry. *Mining Techn.* 2012;121(3):160-176.
- Bertinshaw R., Lipton I. Estimating mining factors (dilution and ore loss) in open pit mines. Sixth Large Open Pit Mining Conference. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2007. P. 13-18.
- Сытенков В.Н., Коломников С.С., Наимова Р.Ш. Разработка технологических схем формирования внутренних отвалов в отработанной части карьера Мурунтау // Горный вестник Узбекистана. 2009. № 4. С. 21-24.
Sytenkov V.N., Kolomnikov S.S., Naimova R.Sh. Development of process sheets for creation of internal dumps in the worked-out part of the Muruntau open-pit mine. *Gornyj vestnik Uzbekistana*. 2009;(4):21-24. (In Russ.).
- Наимова Р.Ш. Обоснование разработанных технологических схем формирования внутренних отвалов в отработанной части карьера Мурунтау // Горный вестник Узбекистана. 2016. № 2. С. 25-30.
Naimova R.Sh. Justification of the developed process sheets for creation of internal dumps in the worked-out part of the Muruntau open-pit mine. *Gornyj vestnik Uzbekistana*. 2016;(2):25-30. (In Russ.).
- Сытенков В.Н., Наимова Р.Ш. Формирование высоких одноярусных отвалов при переменной несущей способности основания. Ташкент: «Фан» АН РУз, 2007. 134 с.
- Правила безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Ташкент: 2011. 126 с.
- Наимова Р.Ш. Определение параметров деформаций автомобильных отвалов в условиях карьера Мурунтау // Горный вестник Узбекистана. 2007. № 2. С. 66-68.
Naimova R.Sh. Definition of deformation parameters for vehicle-created dumps in conditions of the Muruntau open pit mine. *Gornyj vestnik Uzbekistana*. 2007;(2):66-68. (In Russ.).
- Силкин А.А., Кольцов В.Н. Применение метода интегральных уравнений для оценки напряженного состояния уступов и бортов // Горный вестник Узбекистана. 2000. № 1. С. 64-68.
Silkin A.A., Koltsov V.N. Application of the integral equations method to assess the stress state of benches and walls. *Gornyj vestnik Uzbekistana*. 2000;(1):64-68. (In Russ.).
- Сытенков В.Н., Наимова Р.Ш. Исследования взаимосвязи параметров деформаций с параметрами отвалов // Рациональное освоение недр. 2015. № 4. С. 68-71.
Sytenkov V.N., Naimova R.Sh. Research results of the interrelation between rock dumps parameters and their deformational parameters. *Ratsional'noe osvoenie neдр*. 2015;(4):68-71. (In Russ.).
- Наимова Р.Ш. Концепция согласованного развития и использования систем пространственных ресурсов при открытой разработке месторождений // Горный вестник Узбекистана. 2008. № 2. С. 46-51.
Naimova R.Sh. The concept of coordinated development and use of spatial resources systems in open-pit mining. *Gornyj vestnik Uzbekistana*. 2008;(2):46-51. (In Russ.).
- Совершенствование процессов открытой разработки сложноструктурных месторождений эндогенного происхождения / Кучерский Н.И., Мальгин О.Н., Лукьянов Ф.Н. и др. Ташкент: «Фан» АН РУз, 1998. 254 с.
- Быковцев А.С., Прохоренко Г.Н., Сытенков В.Н. Моделирование геодинамических и сейсмических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых. Ташкент: «Фан» АН РУз, 2000. 271 с.
- Попов В.Н., Шпаков П.С. Управление устойчивостью карьерных откосов. М.: Горная книга, 2007. С. 490-500.
- Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ. М.: Изд. МГУ, 2003. С.189-202.

Authors Information

Nasirov U.F. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Director on Research and Innovations, Almalyk Branch of National Research University of Science and Technology (MISIS), Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan

Zairov Sh.Sh. – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Mining Department, Almalyk Branch of National Research University of Science and Technology (MISIS), Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan

Demin V.F. – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Development of Mineral Deposits, A. Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: vladfdemin@mail.ru

Akhmaturov D.R. – Head of the Methane Energy Laboratory, A. Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.akhmaturov@gmail.com

Musin R.A. – Associate Professor of the Department of Development of Mineral Deposits, A. Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: R.A.Mussin@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.02.2026

Поступила после рецензирования: 16.03.2026

Принята к публикации: 30.03.2026

Paper info

Received February 24, 2026

Reviewed March 16, 2026

Accepted March 30, 2026