Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-169-177

Оптимизация геометрии резца для глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи

Д.С. Юсов, П.В. Иванова, С.Л. Иванов✉
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерацияимени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация
✉ Ivanov_SL@pers.spmi.ru

Резюме: В работе представлено экспериментальное обоснование рациональных геометрических параметров режущих элементов машин для глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи. Ключевой проблемой процесса является наличие погребённой древесины влажностью до 64%, вызывающей кратное увеличение динамических нагрузок и энергоёмкости. Цель исследования – определение оптимальной геометрии резца, минимизирующей удельную работу резания в условиях блокированного резания анизотропной среды. Методология базируется на сравнительных испытаниях прямоугольных, тарельчатых и грибовидных резцов на маятниковом копре при варьировании заднего угла (0–18°). Обеспечено кинематическое и динамическое подобие лабораторной схемы натурным фрезерным барабанам (МТП-41/44), что позволило экстраполировать результаты с применением верифицированных масштабных коэффициентов. Установлено, что прямоугольный резец обеспечивает наименьшую удельную работу резания (179,15 кДж/м³ вдоль волокон, 209,00 кДж/м³ поперёк), превосходя криволинейные аналоги на 7–10%. Выявлены оптимальные параметры: задний угол α = 15°, угол резания δ = 60°, угол в плане φ = 75°, радиус при вершине 3 мм. Показано, что поперечная ориентация волокон увеличивает энергозатраты на 16%, а рост влажности древесины до 64% повышает удельную работу в 1,8 раза. Полученные данные позволяют рекомендовать предложенную геометрию для оснащения серийных торфяных фрез, а разработанную экспресс-методику – для проектирования инструмента без проведения дорогостоящих натурных испытаний.

Ключевые слова: глубокое фрезерование торфа, погребённая древесина, геометрия резца, удельная работа резания, блокированное резание, масштабное моделирование

Для цитирования: Юсов Д.С., Иванова П.В., Иванов С.Л. Оптимизация геометрии резца для глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи. *Горная промышленность*. 2026;(5):169–177. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-169-177

Optimization of cutter geometry for deep milling of stump-containing peat deposit

D.S. Yusov, P.V. Ivanova, S.L. Ivanov✉
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ Ivanov_SL@pers.spmi.ru

Abstract: This paper presents an experiment-based justification of rational geometric parameters for cutting elements of machines designed for deep milling of stump-containing peat deposits. A key challenge in this process is the presence of buried wood with the moisture content up to 64%, which causes a multiple increase in the dynamic loads and energy consumption. The study aims at determining an optimal cutter geometry that minimizes the specific cutting work under conditions of blocked cutting of an anisotropic medium. The methodology is based on comparative tests of rectangular, disc-shaped, and mushroom-shaped cutters using a pendulum impact tester with the clearance angle varying from 0° to 18°. The kinematic and dynamic similarity between the laboratory setup and full-scale milling drums (MTP-41/44) was ensured, enabling extrapolation of the results using verified scaling coefficients. The results demonstrate that the rectangular cutter yields the lowest specific cutting work (179.15 kJ/m³ along the grain, 209.00 kJ/m³ across the grain), outperforming curvilinear counterparts by 7–10%. The optimal parameters were identified, e.g. the clearance angle α = 15°, the cutting angle δ = 60°, the approach angle φ = 75°, and the nose radius of 3 mm. It was shown that transverse fiber orientation increases the energy consumption by 16%, while raising wood moisture content to 64% increases the specific cutting work by a factor of 1.8. The data obtained make it possible to recommend the proposed geometry for the cutting tools of mass-produced peat milling machines, while the developed express assessment methodology enables tool design optimization without costly full-scale field trials.

Keywords: deep peat milling, buried wood, cutter geometry, specific cutting work, blocked cutting, scale modeling
For citation: Yusov D.S., Ivanova P.V., Ivanov S.L. Optimization of cutter geometry for deep milling of stump-containing peat deposit. *Russian Mining Industry.* 2026;(5):169–177. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-169-177

Введение

При проектировании рабочих органов для глубокого фрезерования торфяной залежи первостепенное значение имеет учёт особенностей разрушаемого материала, который представляет собой гетерогенную среду со сложной структурой. В Российской Федерации сосредоточено около 20% мировых запасов торфа, при этом торфяное сырьё составляет треть энергетического потенциала страны в пересчёте на условное топливо, обеспечивая энергобезопасность удалённых и труднодоступных регионов [1; 2]. Помимо энергетической составляющей, торф широко применяется в сельском хозяйстве, химической промышленности, строительстве и при рекультивации нарушенных земель [3].

Ключевым фактором, лимитирующим эффективность глубокого фрезерования, является наличие древесных включений, которые подразделяются на верховые свежие пни, сохраняющие структуру живой древесины после рубки леса, и мёртвые пни, находящиеся в толще залежи длительное время и подвергшиеся частичному разложению и минерализации. Согласно классификации [1] пни, обнаруженные в торфяных залежах, разделяют на четыре основные группы: искривлённые стволы, односторонне-лапчатые, симметрично-лапчатые и лапчатые пни со стержневым корнем. Искривлённые пни имеют средний диаметр 0,07 м при длине вертикального сегмента 0,35 м, тогда как диаметр ствольной части односторонне-лапчатых пней достигает 0,25 м [4]. Объёмная пнистость месторождений варьируется от 1 до 4% и более, при этом встреча резца с погребённой древесиной вызывает возрастание динамических нагрузок на привод фрезы до 70 раз по сравнению с фрезерованием чистого торфа [5–7].

Сопротивление резанию древесных включений существенно зависит от их анизотропной структуры, а именно от расположения волокон по отношению к вектору скорости резания: при параллельном расположении наблюдается эффект скалывания, тогда как при перпендикулярном – эффект рубки с повышенным сопротивлением. По данным исследований, удельная работа резания древесных включений превышает аналогичный показатель для торфа в 10–20 раз, что делает древесину главным фактором при проектировании геометрии режущего инструмента [8].

В отличие от традиционного подхода, предполагающего предварительное удаление древесных включений корчеванием (с использованием машин РКШ-4, МП-4, СП-6,7), технология глубокого фрезерования позволяет совместить операции разрушения торфяной залежи и измельчения погребённой древесины непосредственно в залежи [1]. Однако существующие конструкции резцов (прямые, треугольные, чашечные, тарельчатые) не в полной мере учитывают особенности резания анизотропной среды с высоким уровнем влажности (до 64% для погребённой древесины), что приводит к повышенной энергоёмкости процесса и засорению торфяной крошки неизмельчёнными древесными остатками [9].

Согласно экспериментальным данным [10] увеличение влажности древесины с 15 до 64% приводит к росту удельной работы резания, что требует корректировки геометрических параметров обычного режущего инструмента. При этом, как показано в работе [11], для условий блокированного резания торфяной залежи согласно исследованиям рациональным значением угла резания, обеспечивающим минимальные показатели сопротивления резанию древесных включений при сохранении прочности кромки, является угол $\delta = 60°$ [12; 13]. Для ножей с круглой режущей кромкой (тарельчатых и грибовидных) угол в плане является переменной величиной: он изменяется по периметру кромки от 90° до 0°, что соответствует постепенному внедрению кромки в материал и динамическому изменению условий стружкообразования [14].

Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование рациональных геометрических параметров резца (заднего угла α, угла в плане φ и радиуса при вершине) для глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи с учётом повышенной влажности погребённой древесины (64%) на основе сравнительных испытаний на маятниковом копре с последующей экстраполяцией результатов на натурные условия фрезерования.

Материалы и методы

В условиях глубокого фрезерования пнистой торфяной залежи основным видом взаимодействия резца с материалом является блокированное резание, характеризующееся отсутствием открытых боковых стенок у срезаемого слоя. Данная схема определяет физику процесса: блокированный сход стружки приводит к тому, что деформированный материал не имеет возможности свободного схода в стороны, вызывая повышение давления в зоне перед режущей кромкой. Это обусловливает изменение схемы напряжённого состояния с преобладанием сжимающих напряжений над сдвиговыми, что требует увеличения прочности режущего клина, а также интенсифицирует трение задней поверхности резца о стенки реза из-за упругого восстановления торфа [9; 11].

Согласно исследованиям [7] при блокированном резании коэффициент блокировки для торфяных грунтов составляет 1,0, тогда как для полублокированного – 0,44–0,36, а для свободного (скользящего) – 0,42–0,34. Переход к свободному резанию позволяет снизить энергоёмкость процесса в 1,25–2,3 раза на талых торфах и до 3 раз – на промёрзших [6].

В торфяной промышленности для работы в условиях пнистой залежи применяются фрезы с различными типами расположения режущих элементов: по образующим барабана, по винтовой линии, с ориентацией режущих кромок радиально установленных резцов параллельно оси вращения фрезы и тангенциально установленных резцов. Согласно систематизации [1] рабочие органы машин глубокого фрезерования классифицируются по следующим признакам:

– по типу воздействия на торфяное сырьё (резание, рыхление, комбинированное);

– по движению рабочего органа (попутное, встречное фрезерование);

– по конструкции (барабанные, шнековые, секторальные, баровые);

– по вооружению (ножи, резцы, цепи, фрезы).

В отличие от ножей, выполненных целиком, как правило, из углеродистой закаленной стали, резцы армированы твердым сплавом [12]. В горной промышленности радиальные резцы нашли широкое распространение. Типичным представителем таких резцов получили резцы типа ЗО – радиальные однолезвийные с большим углом резания δ и заднего угла α. При разработке торфяных месторождений в качестве тангенциальных резцов, как правило, применяют резцы типа РШ. Такой резец, имеющий отрицательный угол атаки [13] из-за тангенциальной установки на барабане, формирует вектор силы, направленный вглубь материала. Это вызывает не срезание, а растяжение и разрыв волокон. В результате вместо контролируемого стружкообразования происходит неконтролируемое вырывание фрагментов древесины с образованием грубой неоднородной щепы. Коэффициент формы треугольного резца относительно прямоугольного эталона составляет $K\phi$=0,6, что свидетельствует о его меньшей эффективности при фрезеровании волокнистых материалов [15].

Геометрические параметры резцов и ножей определяют положениями плоскости резания, которая является касательной к поверхности резания и проходит через главную режущую кромку, и основной плоскости, перпендикулярной плоскости резания, измеряют в плоскости, параллельной оси вращения фрезы, и описывают системой углов:

– угол резания δ – между передней гранью резца и плоскостью резания;

– задний угол α – между задней гранью ножа и плоскостью резания;

– угол заострения β = δ - α, с уменьшением угла заострения увеличивается внедрение резца (ножа), но прочность при этом снижается;

– передний угол γ – между передней гранью и плоскостью, нормальной к вектору скорости и проходящей через режущую кромку;

– угол в плане φ – между проекцией главной режущей кромки резца на плоскость и направлением вектора скорости резания.

Следует отметить, что у резцов с круглой режущей кромкой грибовидной формы задний угол равен нулю, а при развитой задней поверхности работа таким резцом сопряжена со значительными потерями на трение. Радиус условно вписанной окружности (радиус притупления) в поверхности режущей кромки лезвия составляет 0,5 мм.

Согласно исследованиям Л.Н. Самсонова [16; 17] значение угла резания δ = 60° обеспечивает минимальные показатели сопротивления резанию древесных включений при сохранении прочности кромки.

Для верификации теоретических положений и уточнения геометрических параметров были проведены экспериментальные исследования на маятниковом копре, моделирующем динамическое внедрение резца. Оценивалась энергоёмкость процесса резания.

Геометрическое подобие модели и натуры фрезерного барабана обеспечивается соответствием траектории движения режущего элемента. Длина маятника копра составляет 0,5 м, что при вращении описывает окружность диаметром 1 м. Данный параметр соответствует типовым диаметрам фрезерных барабанов для глубокого фрезерования торфа (например, МТП-44) [1; 18].

Линейная скорость резания на лабораторном стенде составляет 4,3 м/с, тогда как на серийных фрезерных машинах рабочая скорость достигает 10–15 м/с. Однако согласно исследованиям динамики процесса резания [19] тангенциальная составляющая силы резания в диапазоне скоростей 4–15 м/с изменяется незначительно. Это объясняется компенсацией двух разнонаправленных эффектов: снижением коэффициента трения между инструментом и древесиной при росте скорости и увеличением доли энергии, затрачиваемой на инерционные процессы деформации и ускорения стружки [20].

Динамическое подобие обеспечивается за счёт идентичности схемы нагружения режущей кромки. В обоих случаях резец испытывает ударное внедрение в материал с преобладанием инерционных сил над силами трения в начальный момент контакта. Силы резания определяются преимущественно геометрией клина и механическими свойствами материала, а не скоростью подвода энергии.

Основным критерием подобия при моделировании процессов разрушения пластичных материалов является коэффициент подобия скоростей K_v, связанный с линейным масштабным коэффициентом K_l [21]:

$$K_g = \frac{v_h^2}{K_l v_m^2}, \quad (1)$$

где v_h – окружная скорость фрезерного агрегата в натурных условиях; v_m – скорость резания образца при моделировании; K_l – отношение геометрических размеров натурного объекта к размерам модели. Для рассматриваемого случая масштабный коэффициент K_l=1 (по ширине резца) [18].

Для пересчёта результатов лабораторных испытаний в натурные значения может быть применён масштабный коэффициент. Ожидаемую мощность привода натурного оборудования в расчете на один резец определяют по зависимости [21; 22]:

$$N_н = N_м K_l^{3,5} K_g^{0,5} = N_м K_l^3 \frac{v_н}{v_м}, \quad (2)$$

где $N_м$ – мощность, зафиксированная в эксперименте; K_l – линейный масштабный коэффициент; $v_н$ и $v_м$ – скорости резания в натурных и модельных условиях.

Методика определения и расчёта масштабного коэффициента была ранее верифицирована [15]. В указанном исследовании проведена апробация лабораторного стенда на базе маятникового копра путём сопоставления расчётных мощностных характеристик с данными по методике Л.Н. Самсонова [16; 17; 23].

Согласно экспериментальным данным при увеличении влажности древесины с 15% (справочные значения для сухой древесины по ГОСТ) до 64% (характерной для погребённой древесины в торфяной залежи) удельная работа резания возрастает в 1,8 раза (K_A=1,8), а подача на резец (зуб) снижается на 6% (K_Z=0,94). В настоящем исследовании использовались образцы погребённой древесины (сосна) с влажностью 64%, что соответствует реальным условиям эксплуатации. Полученные результаты могут быть экстраполированы на натурные условия с использованием указанных коэффициентов.

Результаты

Согласно проведённому анализу кинематических параметров фрезерного барабана ключевым параметром глубины резания для резца фрезерного барабана при глубоком фрезеровании пнистой торфяной залежи следует принимать 10 мм при применении машин МТП-41 и МТП-42А. Данное значение получено на основе расчёта по формуле [11; 24]:

Таблица 1
Геометрические параметры моделей резцов

Table 1
Geometric parameters of cutter models

Тип резца	Ширина B, мм	Задний угол α, град	Угол заострения β, град	Угол резания δ, град
Тарельчатый	30	0, 5, 10, 12, 15	60, 55, 50, 48, 45	60
Грибовидный	30	0, 5, 10, 12, 15	60, 55, 50, 48, 45	60
Прямоугольный (прямой)	20	0, 5, 10, 12, 15, 18	60, 55, 50, 48, 45, 42	60

$$h = \frac{v_{маш}\theta}{v_{окр}} R_{\phi}, \quad (3)$$

где $v_{маш}$ =0,211" м/с" – рабочая скорость движения машины; $v_{окр}$ =15" м/с" – окружная скорость вращения фрезерного барабана; θ =1,551 рад – угол сектора резания; $R\phi$ =0,5" м" – радиус сектора резания. Полученное значение находится в пределах допустимых режимов работы оборудования и соответствует рекомендациям по эксплуатации машин данного типа [25].

В качестве экспериментальной установки использовался маятниковый копёр с установленным на нём резцом. Траектория движения модели резца подобна траектории движения натурного образца, установленного на барабане МТП-41. Радиус траектории движения модели резца при закреплении его на маятнике копра равен 0,5 м, что соизмеримо с радиусом траектории движения резцов на фрезерном барабане машины глубокого фрезерования [9].

Достоверность эксперимента на маятниковом копре подтверждается сопоставлением ранее полученных результатов с их теоретической оценкой [26; 27]. Для каждой серии опытов в рабочей зоне маятникового копра жёстко закреплялся древесный образец из погребённой древесины (сосна) относительной влажностью 64%, погружённой в торф. На бойке устанавливался заранее изготовленный резец из углеродистой закаленной стали.

Начальная высота H_0 подъёма маятника копра относительно уровня отсчёта для всех опытов выбиралась равной 0,6 м, а высота подъёма маятника H_1 после взаимодействия с образцом была переменной в зависимости от геометрии испытываемого резца. Таким образом, работа резания в эксперименте определялась разностью высот H_0 и H_1.

Высота подъёма маятника до и после взаимодействия резца с образцом контролировалась штатным стрелочным прибором, а сам эксперимент фиксировался на видео. Обработка полученных результатов осуществлялась в видеоредакторе с покадровой разметкой. Глубина фрезерования (толщина стружки) была принята с учетом коэффициента подобия Kg (выражение (1)) равной 10 мм. Для реализации данного параметра в лабораторных условиях были изготовлены модельные образцы древесины с фиксированной высотой, позволяющие воспроизводить заданный объём разрушаемого материала при каждом внедрении инструмента.

Анализ данных математической обработки результатов измерений показывает, что они были проведены с достаточной точностью. Среднеквадратическое отклонение измерений работы резания древесных включений от угла резания составляет (в % к среднеарифметическому):

– при резании вдоль волокон: от ±7 до ±11%;

– при резании поперёк волокон: от ±6,3 до ±16,2%.

Учитывая хорошую повторяемость результатов, за истинное значение принималось среднее арифметическое пяти последовательно полученных данных в каждой серии испытаний [27].

В ходе экспериментальных исследований были изготовлены и испытаны модели резцов трёх типов: прямоугольный (прямой), тарельчатый и грибовидный. Геометрические параметры моделей резцов приведены в табл. 1. Масштабный коэффициент моделирования K_l =1 относительно натурного резца машины МТП-41 [15]. Для анализа результатов в сравнимых условиях тарельчатый и грибовидный резцы подверглись модификации путем искусственно создаваемого заднего угла от половины диаметра.

Работа резания, удельная работа резания и усреднённое усилие резания рассчитывались по формулам [9; 12]:

$$A_{рез} = mg(H_0 - H_1); \quad (4)$$

$$K = \frac{A_{рез}}{V}; \quad (5)$$

$$F = \frac{A_{рез}}{l}, \quad (6)$$

где $A_{рез}$ – работа резания, Дж; m = 3 кг – масса маятника; g = 9,81м/с^2 – ускорение свободного падения; V – объём срезанного торфа, м^3; l – путь, пройденный резцом, м.

Объём полученной стружки определялся аналитически с учётом площади сечения каждого резца и траектории его движения при глубине резания 10 мм по оставленному следу на образце.

Общая тенденция изменения удельной работы резания всех трех типов резцов такова, что при увеличении заднего угла α от 0 до 10° при неизменном угле резания происходит монотонное снижение удельной работы. При этом значения величин удельной работы соизмеримы для всех трех типов резцов. Дальнейшее увеличение заднего угла для тарельчатых и грибовидных резцов формирует «плато» (при α ≥ 10°), практически сливаясь в одну линию, разница между ними не превышает 3%, что находится в пределах погрешности эксперимента.

Что касается прямоугольного резца, то значения удельной работы с увеличением заднего угла продолжают снижаться, достигая экстремума при 15о.

В табл. 2 представлены усреднённые экспериментальные значения работы резания, объёма срезанной стружки и удельной работы резания для трёх типов резцов при глубине резания 10 мм вдоль и поперек волокон. Для тарельчатого и грибовидного резцов приведены данные при заднем угле α = 10° (минимальное значение удельной работы в диапазоне «плато»), для прямоугольного резца – при α = 15° (минимальное значение).

Как следует из представленных данных, прямоугольный резец обеспечивает наименьшую удельную работу резания, что на 7–10% ниже, чем у тарельчатого и грибовидного резцов. Это подтверждает его преимущество при фрезеровании погребённой древесины с влажностью 64%. При этом рез образца погребенной древесины поперек волокон более энергоемок, чем вдоль волокон. Разница в работах составляет 16%

Согласно данным при увеличении влажности древесины

Таблица 2
Экспериментальные значения работы и удельной работы резания вдоль/поперек волокон

Table 2
Experimental values of the cutting work and the specific cutting work along and across the grain

Тип резца	Работа резания $A_{рез}$, Дж	Объём стружки V, м³ · 10⁻⁵	Удельная работа K, кДж/м³
Прямоугольный	4,76 / 5,56	2,66	179,15 / 209,00
Тарельчатый	7,08 / 7,97	3,58	198,00 / 224,13
Грибовидный	5,9 / 6,67	3,02	196,00 / 222,81

с 15% (справочные значения для сухой древесины по ГОСТ) до 64% (характерной для погребённой древесины в торфяной залежи) удельная работа резания возрастает в 1,8 раза (коэффициент K_A=1,8), а подача на резец (зуб) снижается на 6% (K_Z=0,94). Поскольку в настоящем исследовании использовались образцы сосны с влажностью 64%, соответствующей условиям торфяной залежи, ранжирование геометрий резцов по удельной работе резания, полученное на маятниковом копре, может быть экстраполировано на условия непрерывного фрезерования с использованием указанных коэффициентов.

Обсуждение результатов

Экспериментальные данные, полученные на маятниковом копре, демонстрируют принципиально различные характеры зависимости удельной работы резания от заднего угла для резцов с прямолинейной и криволинейной режущей кромкой.

Для грибовидного и тарельчатого резцов стабилизация значений при $\alpha \geq 10°$ свидетельствует о том, что трение задней поверхности перестало быть основным фактором. Дальнейшее увеличение заднего угла не влияет на энергоёмкость, так как основной вклад вносят другие компоненты: работа сдвига материала в зоне резания и работа формирования стружки. Плавное снижение удельной работы в диапазоне 0–10° обусловлено уменьшением площади контакта задней поверхности с материалом за счёт формирования полноценного зазора. Согласно модели трения при резании сила трения пропорциональна нормальной силе и коэффициенту трения, что ведёт к снижению работы трения и, как следствие, общей удельной работы резания [9; 11].

Полученные зависимости согласуются с результатами работ [6; 28], в которых показано, что переход от блокированного резания к полублокированному и свободному (скользящему) снижает энергоёмкость процесса в 1,25–2,3 и до 3 раз соответственно. При этом коэффициент блокировки для торфяных грунтов, определённый в работе [6], составляет 1,0 для блокированного резания, 0,44–0,36 для полублокированного и 0,42–0,34 для свободного, что ниже значений, характерных для минеральных грунтов (0,75 и 0,5 соответственно). Это объясняется волокнистой структурой торфа и наличием растительных остатков, снижающих эффективность передачи усилий при блокированном резании.

Следует также отметить, что снижение энергоёмкости при увеличении заднего угла для криволинейных резцов до 10° коррелирует с данными работ [19; 29], где показано, что применение ножей с углом наклона режущей кромки 45° снижает усилие резания на 40% по сравнению с прямым ножом ($\varphi = 90°$). Однако в нашем исследовании для криволинейных резцов эффект от увеличения заднего угла менее выражен, что связано с их исходно неоптимальной геометрией (нулевой задний угол у грибовидных резцов).

Для прямого резца значения удельной работы при $\alpha = 5°$ и $\alpha = 10°$ превышают или равны аналогичным показателям для криволинейных резцов. Это объясняется двумя взаимосвязанными факторами:

1. Прямолинейная режущая кромка не обеспечивает отвода срезаемого материала. При блокированном резании это приводит к накоплению стружки перед передней поверхностью, формированию зоны застоя и росту давления в зоне резания. По данным работы [11], затруднённый сход стружки может увеличивать нормальную составляющую силы резания на 30–50%.

2. Прямая задняя грань увеличивает потери на трение при малых углах со значительной площадью контакта с материалом.

Достижение минимального значения удельной работы для прямого резца при $\alpha = 15°$ соответствует теории геометрии клина [16; 18]. Данный угол обеспечивает зазор для исключения трения задней поверхности о материал, учитывая упругое восстановление древесины. Также данный угол сохраняет массивность режущей кромки для сопротивления ударным нагрузкам при контакте с древесными включениями.

Увеличение удельной работы при $\alpha = 20°$ объясняется снижением жёсткости режущего клина. Согласно теории устойчивости процесса резания [19] уменьшение угла заострения при постоянном угле резания приводит к вибрациям при динамическом нагружении, что увеличивает диссипацию энергии.

При резании образцов с поперечной ориентацией волокон относительно вектора скорости резания наблюдается увеличение удельной работы для всех типов резцов и значений заднего угла. Характер зависимостей постоянный, однако абсолютные значения возрастают до 15%. Согласно работе [30] древесина является анизотропным материалом: при резании вдоль волокон разрушение происходит за счёт расслаивания по межволоконным связям (лигнин), прочность которых минимальна; при резании поперёк волокон инструмент перерубает структуру волокон, обладающих высокой прочностью на срез [31; 32].

Полученное увеличение сопротивления резанию на 15% при поперечной ориентации волокон хорошо согласуется с данными работы [5], где показано, что удельная работа резания при фрезеровании погребённой древесины возрастает на 10–25% в зависимости от породы и влажности.

На основании теоретического анализа был выбран прямой резец с задним углом 15° как наиболее энергоэффективный при резании как древесных включений, так и торфа [15]. Однако для дальнейшего совершенствования геометрии инструмента было проведено дополнительное исследование, в котором режущая кромка прямого резца выполнялась с углом в плане φ (наклонное расположение кромки относительно вектора скорости резания).

Согласно работе [19] при наклонном расположении режущей кромки процесс резания сопровождается скольжением материала вдоль кромки, что приводит к снижению нормальной составляющей силы резания и уменьшению

коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью инструмента.

Тангенциальная составляющая скорости резания способствует отводу стружки в сторону, уменьшая площадь контакта между деформированным материалом и передней поверхностью резца. По данным работы [19], коэффициент трения при наклонном резании снижается до 15% по сравнению с прямым резанием (φ = 90°). Таким образом, чем меньше угол в плане, тем больше тангенциальная составляющая, обеспечивающая скольжение материала вдоль режущей кромки.

Однако, как показано в работе [30], уменьшение угла в плане до 45° снижает усилие резания на 40%, но при этом увеличивается концентрация напряжений у вершины резца, что при контакте с твёрдыми древесными включениями приводит к выкрашиванию кромки [33]. Поэтому в нашем исследовании был выбран компромиссный угол φ = 75°, который обеспечивает снижение усилия резания на 23% относительно прямого резания при сохранении достаточной прочности режущей кромки.

Разница удельной работы резания между φ = 67° и φ = 75° составляла всего около 3%, однако в процессе эксплуатации резец изнашивается неравномерно: максимальный износ наблюдается по краям лезвия [12; 34] и на его вершине. Поскольку геометрия естественного износа близка к углу φ = 75°, ресурс резца может быть продлён за счёт начального формирования кромки с φ = 75° и радиусом при вершине 3 мм.

Кроме того, как показано в работе [15], применение резцов с коэффициентом формы $K\phi$, близким к 1 (прямоугольный резец), обеспечивает лучшие показатели энергоэффективности при фрезеровании волокнистых материалов. Для треугольного резца $K\phi$=0,6, для чашечного $K\phi$=1,12.

Настоящее исследование методологически опирается на результаты оценки параметров фрезерования погребённой древесины торфяного месторождения, в которой были установлены закономерности влияния влажности древесины на энергоёмкость процесса при глубине резания 10 мм. В работе экспериментально установлено, что при увеличении влажности сосны с 15 до 64% удельная работа резания возрастает в 1,8 раза (коэффициент K_A=1,8), тогда как подача на резец (зуб) снижается на 6% (K_Z=0,94).

Поскольку в обоих исследованиях использовались образцы сосны с влажностью 64%, соответствующей условиям торфяной залежи, ранжирование геометрий резцов по удельной работе резания, полученное на маятниковом копре, может быть экстраполировано на условия непрерывного фрезерования. Это обосновывает возможность использования экспресс-методики оптимизации геометрии инструмента на базе стационарного фрезерования калиброванных образцов с последующим пересчётом с использованием коэффициентов K_A и K_Z.

Следует отметить, что представленные результаты получены на маятниковом копре, моделирующем единичный акт резания. В реальных условиях фрезерования имеет место непрерывное взаимодействие множества резцов с залежью, что может приводить к дополнительным эффектам, связанным с взаимным влиянием соседних резцов и нагревом инструмента [35]. Кроме того, в настоящем исследовании не рассматривалось влияние износа резца на энергоёмкость процесса, что является важным направлением для дальнейших исследований.

Перспективным направлением также является разработка комбинированной геометрии резца, объединяющей достоинства прямоугольной формы (энергоэффективность) и криволинейной (снижение трения), а также оценка работы резцов при фрезеровании погребённой древесины различных пород (берёза, ольха, ель) и при отрицательных температурах (промёрзшая залежь) [36].

Заключение

Проведённые в рамках настоящего исследования теоретические и экспериментальные работы позволяют сформулировать следующие основные выводы и рекомендации.

Проведённые экспериментальные исследования на маятниковом копре подтвердили достоверность лабораторной методики благодаря обеспечению геометрического и динамического подобия процессу фрезерования натурными барабанами. Радиус траектории движения резца на копре (0,5 м) соответствует типовым диаметрам фрезерных барабанов машин глубокого фрезерования (МТП-44). Использование критериев подобия K_v и K_l позволило корректно экстраполировать результаты лабораторных испытаний на натурные условия с погрешностью, не превышающей 8–10%.

На основании испытаний трёх типов резцов (прямоугольный, тарельчатый, грибовидный) было установлено, что наименьшая удельная работа резания древесины влажностью 64% достигается при использовании прямого (прямоугольного) резца со следующими геометрическими параметрами: задний угол α = 15°; угол резания δ = 60°; угол заострения β = 45°.

Удельная работа резания для прямоугольного резца при рациональных параметрах составила 179,15/209 кДж/м^3, что на 7–10% ниже, чем для тарельчатого и грибовидного резцов. Данные результаты согласуются с исследованиями Л.Н. Самсонова и подтверждаются экспериментальными данными других авторов.

Для криволинейных резцов (тарельчатый, грибовидный) было установлено плавное снижение удельной работы резания при увеличении заднего угла от 0 до 10° с последующим выходом на «плато». Для прямоугольного резца оптимальное значение заднего угла составляет α = 15°. Дальнейшее увеличение заднего угла до 18° приводит к росту удельной работы из-за снижения жёсткости режущего клина и возникновения вибраций при динамическом нагружении.

Оптимизация геометрии прямоугольного резца посредством формирования угла в плане φ = 75° и радиуса при вершине 3 мм позволила снизить энергоёмкость за счёт резания со скольжением (косое резание) и имитации стабилизированной стадии естественного износа. Угол φ = 75° был выбран из-за того, что углы 45–60° и менее обладают менее прочной режущей кромкой при резании древесных включений, а угол φ = 90° показывает результаты усилия резания на 23% выше.

При поперечном фрезеровании волокон относительно вектора скорости резания сопротивление резания на 16% больше, чем при продольном резании. При проектировании режущих элементов данный факт необходимо учитывать с той точки зрения, что ориентация волокон в погребенной древесине внутри торфяной залежи хаотична. Полученные значения сопоставимы с данными, где утверждается, что анизотропия древесины увеличивает удельную работу резания на 10–25%.

Экспериментально подтверждено, что увеличение влажности древесины с 15%, являющейся справочным значением для сухой древесины по ГОСТ, до 64% приводит

к возрастанию удельной работы резания в 1,8 раза (K_A=1,8). Рекомендуется использовать указанные коэффициенты при пересчёте справочных данных по резанию сухой древесины на условия пнистой торфяной залежи.

Методологическая преемственность с выполненными работами по фрезерованию погребенной древесины дает возможность экстраполировать данные на сплошное поверхностно-послойное фрезерование с использованием масштабного коэффициента.

Предложенная геометрия резца (прямоугольный профиль, α = 15°, φ = 75°, радиус при вершине 3 мм) расширяет существующую классификацию режущих элементов машин глубокого фрезерования, дополняя её вариантом, оптимизированным для условий пнистой залежи с влажностью погребённой древесины 64%. Также полученный резец можно оснащать на фрезерный барабан машин типа МТП-41, МТП-42А, МТП-44, которые работают на месторождениях с пнистостью до 4%.

Список литературы / References

1. Юсов Д.С., Иванова П.В., Иванов С.Л. Систематизация рабочих органов машин глубокого фрезерования. *Горная промышленность*. 2024;(3):85–89. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-85-89
Yusov D.S., Ivanova P.V., Ivanov S.L. Systematization of end effectors of deep milling machines for peat extraction. *Russian Mining Industry*. 2024;(3):85–89. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-85-89
2. Кузьмин Г.Ф., Селеннов В.Г., Созинова Л.А. *Торфяные месторождения России. Геология. Экология. Разведка. Использование*. СПб.: Свет; 2019. 386 с.
3. Utenkova T.G., Kremcheev E.A., Nagornov D.O., Ivanov S.L. Mechanical dewatering of sapropel in its small-scale mining technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):308–316. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-308-316
4. Гамаюнов С.Н., Копенкина Л.В. Исследования и разработки в области фрезерования торфяной залежи вместе с пнями. *Труды Инсторфа*. 2025;(31):50–54.
Gamayunov S.N., Kopenkina L.V. Research and development in the field of milling peat deposits together with stumps. *Trudy Instorfa*. 2025;(31):50–54. (In Russ.)
5. Орловский С.Н., Саая С.С.Ш. Экспериментальное исследование технологических режимов резания торфов дискофрезерным рабочим органом. *Системы. Методы. Технологии*. 2024;(3):152–158. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2024-3-152-158
Orlovskiy S.N., Saaya S.S.Sh. Experimental study of technological modes for cutting peat with a disc-milling working body. *Systems. Methods. Technologies*. 2024;(3):152–158. (In Russ.) https://doi.org/10.18324/2077-5415-2024-3-152-158
6. Фомин К.В. Расчет взаимных спектральных плотностей моментов сопротивления на рабочих органах торфяного фрезерующего агрегата. *Записки Горного института*. 2021;251:745–756. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.14
Fomin K.V. Mutual spectral densities calculation of the moments of resistance on the peat milling unit working bodies. *Journal of Mining Institute*. 2021;251:745–756. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.14
7. Тюремнов С.Н. *Торфяные месторождения*. М.; Ленинград: Гостоптехиздат; 1940. 372 с.
8. Штин С.М. Исследования по резанию торфа и болотной древесины. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(6):374–376.
Штин С.М. Исследования по резанию торфа и болотной древесины. Mi*ning Informational and Analytical Bulleti*n. 2012;(6):374–376. (In Russ.)
9. Фомин К.В., Жигульская А.И., Исаев Р.Г. Определение вероятностных характеристик момента нагружения на рабочем органе машины глубокого фрезерования при подготовке торфяной залежи к эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(9):36–42.
Fomin K.V., Zhigulskaya A.I., Isaev R.G. Determination of probabilistic characteristics of load moment at the driven element of a deep milling machine in developing a peat deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(9):36–42. (In Russ.)
10. Хрусталева И.Н., Любомудров С.А., Ларионова Т.А., Бровкина Я.Ю. Повышение эффективности технологической подготовки производства комплектующих для изготовления оборудования минерально-сырьевого комплекса. *Записки Горного института*. 2021;249:417–426. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.11
Khrustaleva I.N., Lyubomudrov S.A., Larionova T.A., Brovkina Y.Y. Increasing the efficiency of technological preparation for the production of the manufacture components equipment for the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:417–426. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.11
11. Фомин К.В. Расчет спектральных плотностей составляющих силы сопротивления на фрезе при взаимодействии с торфом. *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2023;(4):45–52. Режим доступа: https://vestnik-tekh.ru/printed/article/?article=506 (дата обращения: 15.03.2026).
Fomin K.V. Calculation of spectral densities of force components resistance on the cutter when interacting with peat. *Vestnik of Tver State Technical University. Series "Technical Science"*. 2023;(4):45–52. (In Russ.) Available at: https://vestnik-tekh.ru/printed/article/?article=506 (accessed: 15.03.2026).
12. Хорешок А.А., Маметьев Л.Е., Цехин А.М., Борисов А.Ю., Бурков П.В., Буркова С.П., Крестовоздвиженский П.Д. *Производство и эксплуатация разрушающего инструмента горных машин*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2013. 296 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/40566 (дата обращения: 15.03.2026).

13. Гаранин В.Н. Результаты экспериментальных исследований, определяющие влияние угла атаки на силу и мощность процесса открытого резания древесины. *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность*. 2008;(2):209–214. Режим доступа: https://elib.belstu.by/handle/123456789/39270 (дата обращения: 15.03.2026).
Garanin V.N. Results of experimental studies defining the effect of the attack angle on the force and power of the open wood-cutting process. *Proceedings of BSTU. Issue 2. Forest and woodworking industry*. 2008;(2):209–214. (In Russ.) Available at: https://elib.belstu.by/handle/123456789/39270 (accessed: 15.03.2026).

14. Михайлов А.В., Лопатюк А.О. Особенности процесса резания торфяного массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(S44):3–12. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-9-44-3-12
Mikhailov A.V., Lopatyuk A.O. Features of process of cutting of a peat massif. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(S44):3–12. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-9-44-3-12

15. Юсов Д.С., Иванова П.В., Иванов С.Л. Оценка параметров резцов для фрезерования торфа. *Горная промышленность*. 2026;(1):157–163. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-157-163
Yusov D.S., Ivanova P.V., Ivanov S.L. Evaluation of cutter parameters for peat milling. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):157–163. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-157-163

16. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В., Самсонов Л.Н. Развитие фрезерующих машин в торфяном производстве (анализ, перспективы). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003;(10):204–207.
Kopenkin V.D., Kopenkina L.V., Samsonov L.N. Development of milling machines in peat production (analysis, prospects). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2003;(10):204–207. (In Russ.)

17. Самсонов Л.Н., Зюзин Б.Ф. *К вопросу определения оптимальных параметров и режимов работы машин для поверхностно-послойного фрезерования торфяной залежи*. В кн.: Машины и технология торфяного производства. Минск: Вышэйшая школа; 1978. Вып. 8. С. 36–40.

18. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата. *Записки Горного института*. 2020;241:58–67. https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.58
Fomin K.V. Method for estimating the spectrum density of the resistance moment on the working body of a peat milling unit. *Journal of Mining Institute*. 2020;241:58–67. https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.58

19. Резник Н.Е. *Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов*. М.: Машиностроение; 1975. 311 с.

20. Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Технологические требования к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):85–99. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-3/85.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):85–99. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-3/85.pdf (accessed: 15.03.2026).

21. Северцев Н.А., Дарьина А.Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий. *Надежность и качество сложных систем*. 2020;(4):5–14. https://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-4-1
Severtsev N.A., Daryina A.N. Application of similarity criteria for resource development of complex technical systems and products. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2020;(4):5–14. (In Russ.) https://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-4-1

22. Михайлов А.В., Смирнов А.И. Анализ метода выемки торфяного сырья с откоса карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(2-1):197–209. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
Mikhailov A.V., Smirnov A.I. Digging method analyzing organogenic materials mining by in-pit method. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(2-1):197–209. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (accessed: 15.03.2026).

23. Самсонов Л.Н. *Послойно-поверхностное фрезерование торфяной залежи и пути его интенсификации* [автореф. дис. … д-ра техн. наук]. Калинин; 1983. 37 с.

24. Солопов С.Г., Горцакалян Л.О., Самсонов Л.Н. *Торфяные машины и комплексы*. М.: Недра; 1973. 392 с.

25. Зюзин Б.Ф., Жигульская А.И., Яковновский П.А., Яковновская Т.Б. *Машины и оборудование торфяных производств*. Тверь: Тверской государственный технический университет; 2015. 160 с.

26. Фомин К.В., Жигульская А.И. Инженерная методика анализа динамических нагрузок в элементах привода машин глубокого фрезерования. *Труды Инсторфа*. 2015;(12):27–32.
Fomin K.V., Zhigulskaya A.I. Engineering methods of analysis of dynamic loads in the drive elements of deep milling machines. *Trudy Instorfa*. 2015;(12):27–32. (In Russ.)

27. Maksarov V.V., Kufaev V.G. Magnetic abrasive finishing of workpieces for anti-friction bronze slide bearing shells. *International Journal of Engineering*. 2026;39(1):26–33. https://doi.org/10.5829/IJE.2026.39.01A.03

28. Zhang X., Yu S., Hu X., Zhang L. Study on rotary tillage cutting simulations and energy consumption predictions of sandy ground soil in a Xinjiang cotton field. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;217:108646. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108646

29. Малков Л.М., Самсонов Л.Н., Зюзин Б.Ф. Анализ эффективности работы ножевых фрезерующих устройств. *Торфяная промышленность*. 1979;(11);9–11.
Malkov L.M., Samsonov L.N., Zyuzin B.F. Performance analysis of blade-type milling units. *Torfyanaya promyshlennost*. 1979;(11);9–11. (In Russ.)

30. Михайлов А.В., Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Особенности размещения модуля измельчения при внутрикарьерной переработке торфяного сырья. *Горная промышленность*. 2024;(5):94–100. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100
Mikhailov A.V., Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Specific features of a grinding module location in in-pit processing of peat raw materials. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):94–100. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100

31. Бершадский А.Л., Цветкова Н.И. *Резание древесины*. Минск: Вышэйшая школа; 1975. 303 с Режим доступа: https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/berrezdrev/text.pdf (дата обращения: 15.03.2026).

32. Михайлов А.В., Пиирайнен В.Ю., Боброва Е.М., Смирнов А.И. Анализ перспектив использования торфяных почвоулучшителей для рекультивации нарушенных земель. *Горная промышленность*. 2025;(2):124–130. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-124-130
Mikhailov A.V., Piirainen V.Yu., Bobrova E.M., Smirnov A.I. Analysis of the prospects to use peat-based soil conditioners for reclamation of disturbed lands. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):124–130. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-124-130

33. Сивенков А.В., Кончус Д.А., Гареев Д.В., Пряхин Е.И. Нанесение CR–NI-покрытий методом химико-термической обработки из растворов легкоплавких металлов. *Черные металлы*. 2024;(12):101–106. https://doi.org/10.17580/chm.2024.12.14
Sivenkov A.V., Konchus D.A., Gareev D.V., Pryakhin E.I. Application of Cr – Ni coatings by chemical-thermal treatment from lowmelting metal solutions. *Chernye Metally*. 2024;(12):101–106. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/chm.2024.12.14

34. Фомин К.В. Моделирование нагрузок на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата с учетом погрешности расстановки режущих элементов. *Горные науки и технологии*. 2022;7(2):161–169. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-161-169
Fomin K.V. Simulation of loads on operating device of peat-cutting unit with regard to errors in the cutting elements arrangement. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):161–169. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-161-169

35. Шемякин С.А., Шишкин Е.А. Физико-математическая модель разрушения горных пород зубом фрезерной установки. *Записки Горного института*. 2021;251:639–647. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3
Shemyakin S.A., Shishkin E.A. Physical and mathematical model of rock destruction by a milling machine cutter. *Journal of Mining Institute*. 2021;251:639–647. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.3

36. Пряхин Е.И., Сивенков А.В., Гареев Д.В., Сердюк Н.А., Калинин Г.Ю. Защита внутренней поверхности трубных изделий путем диффузии Cr из расплавов легкоплавких металлов. *Черные металлы*. 2026;(5):48–53. https://doi.org/10.17580/chm.2026.05.07
Pryakhin E.I., Sivenkov A.V., Gareev D.V., Serdyuk N.A., Kalinin G.Yu. Protection of the inner surface of tubular products by Cr diffusion from low-metal melts. *Chernye Metally*. 22026;(5):48–53. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/chm.2026.05.07

Информация об авторах
Юсов Денис Сергеевич – аспирант кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: denis-yus3@mail.ru
Иванова Полина Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-8338-418X
Иванов Сергей Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-7014-2464

Информация о статье
Поступила в редакцию: 14.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 30.06.2026

Information about the authors
Denis S. Yusov – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: denis-yus3@mail.ru.
Polina V. Ivanova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-8338-418X
Sergey L. Ivanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-7014-2464

Article info
Received: 14.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 30.06.2026