

Анализ технологических требований и критериев при выборе гидравлического экскаватора для карьерной выемки торфяного сырья

А.В. Михайлов, А.И. Смирнов ✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ a.s.555@inbox.ru

Резюме: Перспективной технологией разработки торфяных месторождений, которой возможно осуществлять практически круглогодичную добычу сырья, является карьерный способ. Наиболее распространенным оборудованием для карьерного способа добычи является гусеничный одноковшовый гидравлический экскаватор, оборудованный обратной лопатой. Цель исследования – обосновать технологические требования к карьерной выемке торфяного сырья и критерии выбора гидравлического экскаватора с обоснованием формы ковша. В статье предложена технологическая схема разработки торфяного месторождения с выемкой торфяного сырья путем срезания стружки постоянной толщины с откоса карьера (коэффициент заложения 1:1) со всей глубины залежи и раздельной выемкой крупных древесных включений. На основе анализа горно-геологических особенностей торфяных залежей сформулированы ключевые критерии выбора экскаватора по: допустимому удельному давлению на слабый грунт $[q] \geq 10\text{--}18$ кПа, возможности выемки торфяного сырья со всей глубины карьера до 4 м и рациональной толщине срезаемой стружки 0,16 м. Для выемки торфяного сырья карьерным способом рекомендован экскаватор 3-й размерной группы (10–18 т) с гусеницами шириной 1,5 м, мощностью двигателя 70–100 кВт и ковшом вместимостью 1,25 м³ шириной 1,4 м. Экспериментально показано, что по сравнению со стандартным ковшом при использовании режущей пластины с прогибом и треххвальной режущей кромкой достигается снижение сопротивления резанию торфяной залежи на 35%.

Ключевые слова: торфяное месторождение, слабый грунт, карьерный способ, выемка торфяного сырья, гидравлический экскаватор, ковш, режущая кромка

Для цитирования: Михайлов А.В., Смирнов А.И. Анализ технологических требований и критериев при выборе гидравлического экскаватора для карьерной выемки торфяного сырья. *Горная промышленность*. 2026;(4S):157–164. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-157-164>

Analysis of technical requirements and criteria for selecting a hydraulic backhoe for open-pit mining of peat

A.V. Mikhailov, A.I. Smirnov ✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ a.s.555@inbox.ru

Abstract: The open-pit mining method is a promising technology for developing peat deposits, as it makes it possible to excavate the raw materials virtually all year round. The most common equipment used in open-pit mining is a tracked single-bucket hydraulic backhoe. The purpose of this study is to justify the technical requirements for open-pit mining of peat and to establish criteria for selecting a hydraulic backhoe, including a justification for its bucket shape. The article proposes a technological solution for the development of a peat deposit with extraction of raw peat by cutting layers of a constant thickness from the slope face (the slope ratio of 1:1) to the entire depth of the deposit with separate extraction of large-size wood debris. The following key criteria for selecting a backhoe were formulated based on analyzing the mining and geological features of peat deposits: permissible specific pressure on the soft ground $[q] \geq 10\text{--}18$ kPa, the ability to extract peat from the entire open-pit depth of up to 4 m and a rational cutting depth of 0.16 m. A backhoe of the 3rd size group (10–18 t) with 1.5 m wide tracks, an engine power of 70–100 kW with the bucket width of 1.4 m and its capacity of 1.25 m³ is recommended for open-pit mining of peat deposits. Experiments have shown that using a cutting plate with a deflection and a three-bevel cutting edge helped to achieve a reduction in the cutting resistance of peat by 35% compared to a conventional backhoe bucket.

Keywords: peat deposit, soft ground, open-pit mining, peat excavation, hydraulic excavator, bucket, cutting lip

For citation: Mikhailov A.V., Smirnov A.I. Analysis of technical requirements and criteria for selecting a hydraulic backhoe for open-pit mining of peat. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):157–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-157-164>

Введение

В настоящее время перспективной технологией разработки торфяных месторождений является карьерный способ, по которому возможно осуществлять практически круглогодичную добычу торфяного сырья, что снижает общие затраты и повышает эффективность производства [1–3]. Карьерный способ разработки торфяных месторождений широко применялся во второй половине XX в. для производства кускового торфа [4–6]. Торфяная залежь разрабатывалась с применением многоковшовых экскаваторных комплексов на полную глубину торфяной залежи путем срезания стружки постоянной толщины до 0,15 м с поверхности откоса торфяного карьера, коэффициент заложения которого составлял 1:1 [7–9].

В современных экономических условиях наиболее распространенным оборудованием для добычи полезных ископаемых, строительных и ландшафтных работ является гусеничный одноковшовый гидравлический экскаватор, оборудованный обратной лопатой [10–12]. Таким образом, одной из основных задач проведенного исследования является анализ карьерного способа разработки торфяных месторождений с применением гидравлического экскаватора [13–15].

Целью проведенного исследования является обоснование технологических требований к карьерной выемке торфяного сырья и критериев выбора гидравлического экскаватора с обоснованием формы ковша.

Материалы и методы

Анализ карьерной выемки торфяного сырья

В работах [16] сформулирован ряд технологических требований по выемке торфяного сырья на основе анализа особенностей разработки торфяных месторождений многоковшовыми экскаваторными комплексами.

Выемку торфяного сырья предлагается осуществлять одноковшовым гидравлическим экскаватором по всей ширине забоя шириной 30 м при перемещении зигзагом (рис. 1) [17–19]. Экскаватор позиционируется таким образом, чтобы весь забой отрабатывался с четырех установок с целью достижения минимизации потери времени на передвиж-

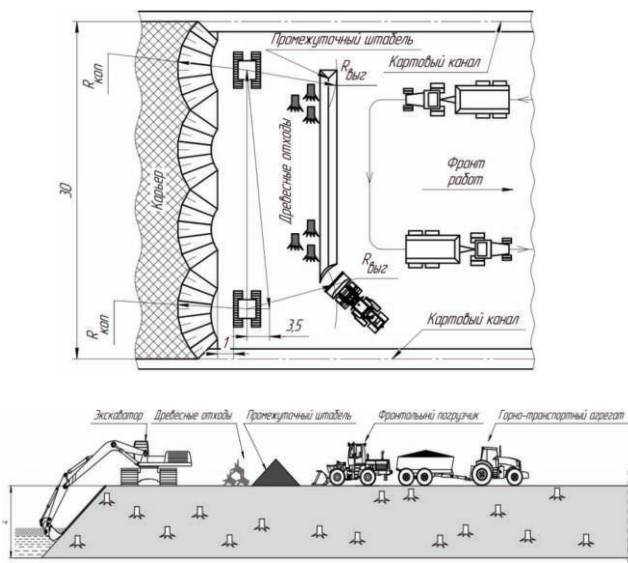


Рис. 1
Технологическая схема разработки торфяного месторождения

Fig. 1
A technological scheme of mining a peat deposit

ку. На каждой установке выполняется от 5 до 20 рабочих циклов.

С учетом процентного отношения объема древесных включений в торфяной залежи к её объёму (от 0,5 до 3,0% [20]) при разработке торфяного месторождения рабочий цикл копания экскаватора можно разделить на два типа:

- выемка торфяного сырья производится с разгрузкой ковша в промежуточный штабель гравитационного обезвоживания [21–23];
- периодическая выемка крупных древесных включений из залежи с разгрузкой в отвал древесных отходов.

Фронтальный погрузчик осуществляет погрузку торфяного сырья из промежуточного штабеля в горнотранспортный агрегат для вывоза за пределы карьера на площадку штабелирования. Древесные отходы вывозятся также фронтальным погрузчиком за пределы карьера на площадки штабелирования для дальнейшей переработки в технологическую щепу.

Выбор гидравлического экскаватора

Горно-геологические условия при разработке торфяных месторождений имеют следующие особенности [24–26]:

- предварительно осушенные торфяные залежи со снятым древостоем являются средними по проходимости, проезд по которым возможен у гусеничных машин в бо-лотном исполнении с допустимым удельным давлением на грунт $[q_{\text{доп}}] \geq 10\text{--}18 \text{ кПа}$;
- параметрическая схема экскаватора должна соответствовать длине разрабатываемого откоса карьера торфяной залежи со средней глубиной до 4 м, с учетом коэффициента заложения откоса 1:1 и безопасного расстояния от бровки не менее 1 м;
- торфяные грунты относятся к I категории по трудности копания с плотностью в залежи 800–1000 кг/м³, что в два раза меньше, чем у суглинков и глин [27; 28].

С учетом приведенных критериев установлено, что для обеспечения повышенной проходимости и устойчивости торфяного откоса рационально выбрать экскаватор 3-й размерной группы (10–18 т), который обеспечивает минимальное давление на слабый грунт и оснащен гусеницами шириной 1,5 м и двигателем мощностью 70–100 кВт с параметрической схемой выемки торфяного сырья с глубины до 4 м. Для выемки торфяного сырья рекомендуется применять ковши со сплошной режущей кромкой [29–31].

Методический подход к оценке типоразмера ковша экскаватора учитывает критерии оптимизации использования техники, предложенные проф. В.И. Баловневым:

- 1) показатель оценки по увеличению производительности:

$$П_{\text{тех}} = q_{\text{ков}} / t_{\text{ц}} \rightarrow \max;$$

- 2) показатель оценки по снижению энергоемкости:

$$E_{\text{экс}} = N_{\text{экс}} / П_{\text{экс}} \rightarrow \min,$$

где $q_{\text{ков}}$ – вместимость ковша экскаватора, м³; $t_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла копания экскаватором, с; $N_{\text{экс}}$ – мощность двигателя экскаватора, кВт.

Основываясь на предложенной технологической схеме (см. рис. 1), техническая производительность экскаватора за один цикл можно определить из выражения:

$$П_{\text{тех}} = \frac{\xi B_{\text{ков}} H G k_{\text{н}}}{T_{\text{тс}} k_{\text{п}} \sin \gamma}; \quad (1)$$

где $B_{\text{ков}}$ – ширина ковша; H – глубина карьера; G – толщина стружки; γ – угол откоса карьера; k_n – коэффициент наполнения ковша; k_p – коэффициент разрыхления торфа; $T_{\text{тс}}$ – полная продолжительность цикла выемки торфяного сырья; ξ – коэффициент, учитывающий сокращение цикла за счет совмещения различных операций во времени.

Энергоёмкость выемки торфяного сырья за один цикл оценивается выражением:

$$E_{\text{экс}} = \frac{N_{\text{экс}} T_{\text{тс}} k_p \sin \gamma}{\xi B_{\text{ков}} H G k_n}. \quad (2)$$

По полученным выражениям можно определить рациональную толщину срезаемой стружки с откоса торфяного карьера при средней глубине залежи 4,0 м и полной продолжительности цикла выемки торфяного сырья 27 с, средней мощности двигателя экскаватора 85 кВт и стандартном ряде типоразмеров выемочного ковша (табл. 1). Результаты представлены на графике (рис. 2).

Таблица 1
Стандартный ряд
типоразмеров выемочного
ковша

Table 1
A standard range
of conventional backhoe
bucket sizes

Параметры ковша	Типоразмеры						
Объем, м ³	0,6	0,8	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5
Ширина, м	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8

Источник: [32]
Source: [32]

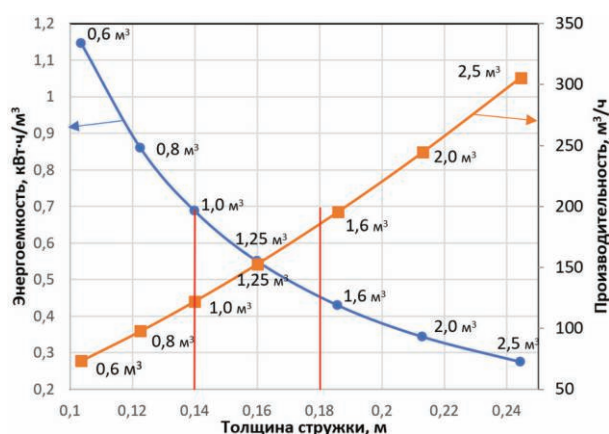


Рис. 2
График выбора типоразмера
ковша по толщине срезаемой
стружки

Fig. 2
A graph for selecting the
bucket size based on the
cutting depth

Анализ схем взаимодействия прямой режущей кромки с торфяным массивом показывает, что:

– при нормальном резании торфяной залежи (рис. 3, а) напряжения, возникающие в материале перед режущей кромкой ковша, не приводят к смещению материала вдоль режущей кромки ($\tau = 0$). В этом случае материал будет разрушен только под действием силы N_v ;

– при косом резании (рис. 3, б) возникает смещение материала вдоль режущей кромки под действием нормального и касательного напряжения, но без участия касательной силы N_T . При этом угол τ между нормалью к режущей кромке и направлением продольного смещения материала не превышает угол трения ϕ режущей кромки по материалу ($0 \leq \tau \leq \phi$);

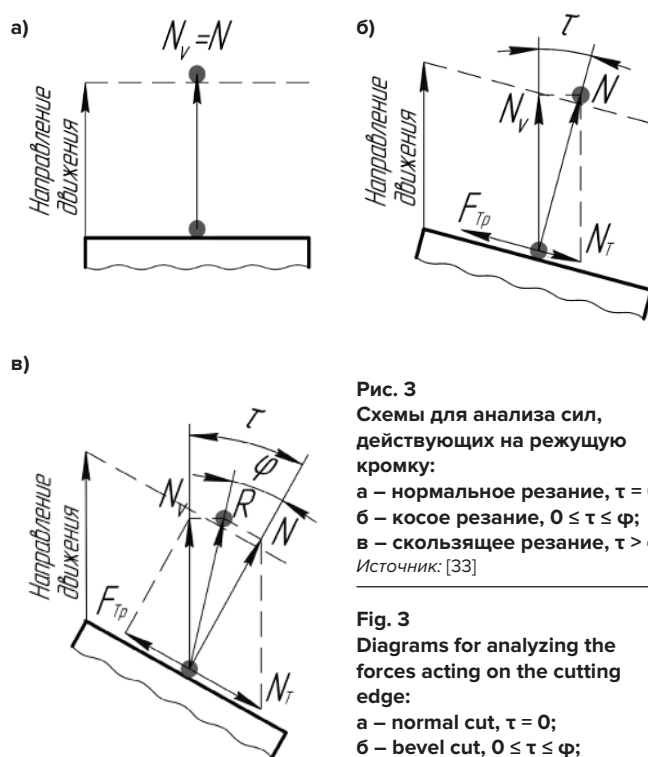


Рис. 3
Схемы для анализа сил,
действующих на режущую
кромку:
а – нормальное резание, $\tau = 0$;
б – косое резание, $0 \leq \tau \leq \phi$;
в – скользящее резание, $\tau > \phi$
Источник: [33]

Fig. 3
Diagrams for analyzing the
forces acting on the cutting
edge:
а – normal cut, $\tau = 0$;
б – bevel cut, $0 \leq \tau \leq \phi$;
в – sliding cut, $\tau > \phi$
Source: [33]

– при скользящем резании (рис. 3, в) возникает смещение материала вдоль режущей кромки под действием нормального и касательного напряжения с участием касательной силы N_T . При этом угол τ между нормалью к режущей кромке и направлением продольного смещения материала превышает угол трения ϕ режущей кромки по материалу ($\tau > \phi$).

Отсюда аналитическое выражение для полного сопротивления резанию N_v , действующего на кромку режущей пластины (3):

$$N_v = N \cos \tau (1 + f \operatorname{tg} \tau), \quad (3)$$

где N – полное нормальное давление режущей кромки; τ – угол наклона режущей кромки; f – коэффициент трения материала о кромку режущей пластины.

При взаимодействии режущей пластины с торфяным массивом уменьшение полного усилия резания N_v торфяной залежи достигается путем изменения угла наклона режущей кромки τ при постоянном коэффициенте трения материала о кромку режущей пластины ϕ при соблюдении условия $\tau > \phi$.

Таким образом, охарактеризовать рациональную форму режущей кромки пластины, у которой будет наблюдаться скользящее резание при минимальном полном сопротивлении резания, можно коэффициентом скользящего резания $k_{\text{скр}}$ с учетом криволинейной формы режущей кромки:

$$k_{\text{скр}} = \int_{-\tau}^{\tau} \cos \tau (1 + f \operatorname{tg} \tau) d\tau. \quad (4)$$

В ходе исследования был проведен анализ четырех видов режущих пластин для ковша экскаватора, режущие кромки которых выполнены прямой, трапециевидной, овальной и трёховальной формами (рис. 6, табл. 2). Схемы взаимодействия прямой и овальной режущей профилей ковша с торфяной залежью показаны на рис. 4.

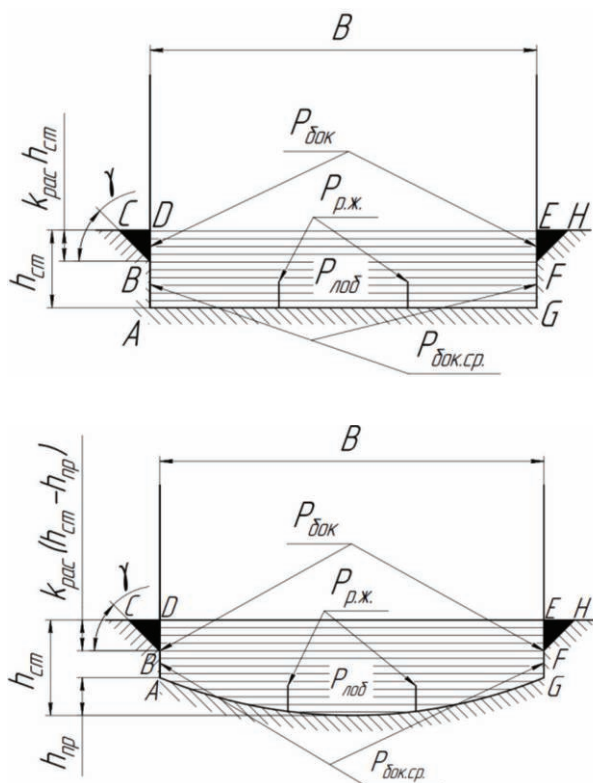


Рис. 4
Схемы для анализа сил,
действующих на режущую
кромку

Fig. 4
Schematic diagrams to
analyze the rectangular and
bevel bucket profiles

Охарактеризовать рациональную форму профиля ковша возможно через коэффициент формы профиля ковша:

$$k_{\text{прф}} = \frac{\delta_{\text{пл}} l_{\text{кр}}}{h_{\text{ст}} B}, \quad (5)$$

где $\delta_{\text{пл}}$ – толщина режущей пластины; $l_{\text{кр}}$ – периметр режущей кромки; $h_{\text{ст}}$ – толщина срезаемой стружки; B – ширина профиля ковша.

Сопротивление резанию торфяного грунта:

$$P_p = P_{\text{лоб}} + P_{\text{бок}} + P_{\text{бок.ср.}} + P_{\text{рж}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{лоб}}$ – сопротивление грунта резанию передней грани режущей кромки; $P_{\text{бок}}$ – сопротивление грунта разрушению по боковым расширениям прорези BCD и FEN; $P_{\text{бок.ср.}}$ – сопротивление грунта резанию боковыми ребрами у дна прорези по линии АВ и FG; $P_{\text{рж}}$ – сопротивление грунта резанию ребрами жесткости.

Так как прямоугольный и овальный режущий профили оснащаются режущими пластинами с разной геометрической формой режущей кромки, то в общем виде для каждого профиля с учетом коэффициента скользящего резания $k_{\text{скр}}$ выражение (6) приобретает вид:

$$P_p = k_p \sum_{i=1}^n S_n k_{\text{скр},n} + 2k_p k_{\text{бок}}^2 h_{\text{ст}}^2 \text{ctg} \gamma + + k_p (1 - k_{\text{бок}}) (2h_{\text{ст}} k_{\text{скр},n} + n_{\text{рж}} h_{\text{рж}} k_{\text{скр},\text{рж}}), \quad (7)$$

где k_p – удельное сопротивление грунта резанию; $k_{\text{скр},n}$ – коэффициент скользящего резания n-й частью кром-

ки пластины; S_n – площадь срезаемого грунта; $h_{\text{ст}}$ – толщина срезаемой стружки; $k_{\text{бок}}$ – коэффициент глубины расширяющейся части прорези (0,80–0,95); γ – угол сдвига боковых расширений прорези; $h_{\text{рж}}$ – высота ребра жесткости; $n_{\text{рж}}$ – количество ребер жесткости; $k_{\text{скр},\text{рж}}$ – коэффициент скользящего резания ребра жесткости.

Выражение (7) позволяет аналитически оценить полное сопротивление резанию торфяной залежи режущими профилями различной формы и установленными на них режущими пластинами, имеющими сложную форму режущей кромки (табл. 3).

Целью экспериментальной части работы является определение рациональной формы режущего профиля и кромки режущей пластины в ходе сравнительных испытаний на сопротивление резанию торфяного целика. Для проведения экспериментальных исследований был создан комплекс грунтового канала (рис. 5).

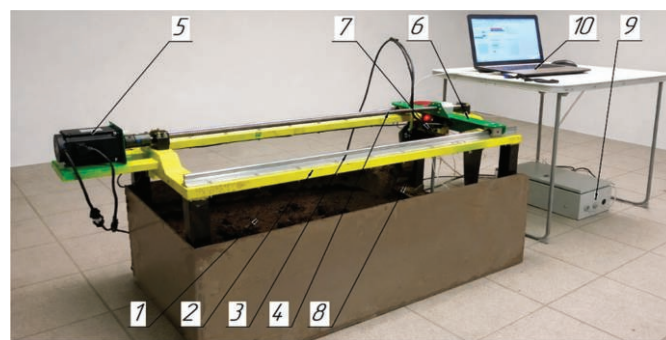


Рис. 5
Общий вид комплекса
грунтового канала:
1 – торфяной массив;
2 – жесткая рама;
3 – направляющие рейки;
4 – винт шарико-винтовой
передачи; 5 – сервопривод;
6 – направляющая каретка;
7 – тензодатчик;
8 – режущий профиль
с режущей пластиной;
9 – блок управления;
10 – персональный компьютер

Fig. 5
A general view of the ground
canal complex:
1 – peat mass;
2 – rigid frame;
3 – guiding rails;
4 – ball screw;
5 – servo-controlled drive;
6 – guiding carriage;
7 – strain gage sensor;
8 – cutting profile
with the cutting plate;
9 – control module;
10 – personal computer

Блок управления каналом включает в себя блок драйвера сервопривода, модуль аналого-цифрового преобразователя, аварийный выключатель и общий блок управления. Управление движением каретки в канале производится с помощью персонального компьютера [34].

Работа с комплексом предусматривает линейное перемещение каретки с режущим профилем по направляющим с точностью 0,1 мм и синхронную регистрацию горизонтального усилия резания тензодатчиком с периодичностью 0,1 с. При достижении конечной позиции каретки массив данных экспортируется в табличном виде на персональный компьютер с последующим построением графика действующих нагрузок.

В качестве модели торфяного массива использовалось торфяное сырье, предварительно заготовленное на месторождении «Заозерское» Ломоносовского района Ленинградской области, со степенью разложения 20%, средней плотностью 754 м³/кг, показателем конусности 0,54 МПа, среднем сопротивлении грунта на сдвиг 0,12 МПа и влажностью 85%.

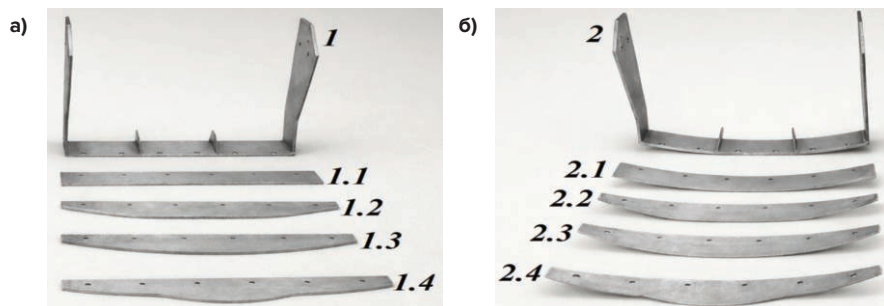


Рис. 6
Фотографии режущих профилей с режущими пластинами:
а – прямой профиль;
б – профиль с провисом

Fig. 6
Photographs of cutting profiles with the cutting plates:
a – straight profile;
b – sagging profile

Таблица 2
Характеристики режущих пластин и срезаемой стружки

Форма профиля	Форма режущей кромки пластины	Длина режущей кромки, мм	Коэффициент скользящего резания $k_{ср}$	Коэффициент профиля ковша $k_{прф}$	Площадь срезаемой стружки, мм ²	Толщина стружки, мм	Ширина стружки, мм
Прямой	Прямая	346	1,00	0,15	6762	23	300
	Трапецевидная	358	0,96				
	Овальная	354	0,82				
	Треховальная	354	0,76				
С провисом	Прямая	312	1,00	0,14	6673	30	
	Трапецевидный	324	0,96				
	Овальная	320	0,82				
	Треховальная	320	0,76				

Table 2
Characteristics of the cutting plates and the chips cut

Для проведения экспериментальных работ были изготовлены модели ковша в виде профилей с режущими пластинами с разными режущими кромками (рис. 6). Геометрические характеристики режущих кромок с углом заточки 15° и параметры срезаемой стружки представлены в табл. 2.

Экспериментальные исследования проводились при доверительной вероятности по критерию Стьюдента, равной 95%, с каждым режущим профилем и установленной режущей пластиной проводилось пять повторных опытов. Фиксировались следующие параметры: усилие резания торфяного массива, длина перемещения режущего профиля.

Результаты

На основе полного многофакторного эксперимента проведено математическое описание процесса резания торфяного целика в окрестности точки факторного пространства с координатами $k_{ср}$ (безразмерный коэффициент скользящего резания) и $k_{прф}$ (безразмерный коэффициент профиля ковша), в которой все члены значимы, а сама модель адекватна описываемому процессу по расчётному значению критерия Фишера. Регрессионная зависимость усилия резания торфяного грунта $P_{рез}$ от факторов $k_{ср}$ и $k_{прф}$:

$$F_{рез} = -164,4 + 159,9k_{ср} + 930k_{прф}. \quad (8)$$

На рис. 7 показана трехмерная поверхность отклика усилия резания торфяного грунта, характеризующаяся коэффициентом скользящего резания режущей кромки и коэффициентом профиля ковша. Анализ полученного графика показывает, что при сравнении ковшей экскаватора с одинаковой шириной наименьшее усилие резания торфяного грунта наблюдается у ковша, который характеризуется наименьшими коэффициентами профиля ковша и скользящего резания.

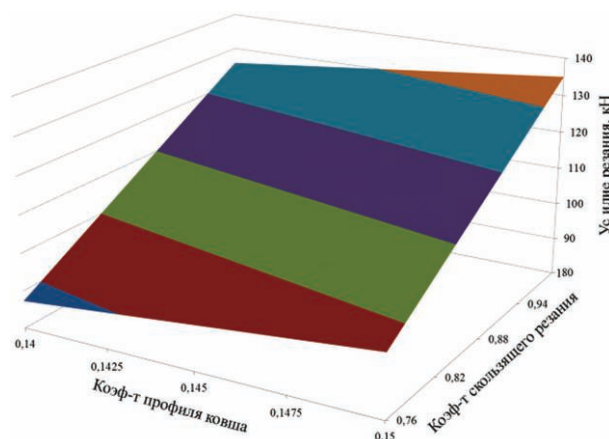


Рис. 7
Поверхность отклика изменения усилия резания от параметров ковша

Fig. 7
The response surface of the cutting force change depending on the backhoe bucket parameters

На основе результатов проведенного исследования получены значения усилия резания торфяного грунта прямым режущим профилем и профилем с провисом, на которых установлены пластины с различными режущими кромками, методом аналитической, экспериментальной и полной многофакторной оценки (табл. 3).

Анализ полученных результатов показывает, что при использовании режущего профиля ковша с провисом наблюдается снижение усилия резания торфяного грунта до 11% по сравнению с прямым режущим профилем вне зависимости от установленной режущей пластины. Снижение усилия резания обуславливается уменьшением деформаций сжатия и сопротивления трению грунта при его перемещении внутри профиля вследствие меньшей длины режущей части кромки, сжимающей грунт, по отношению



Таблица 3

Результаты исследования усилия резания торфяного грунта режущими профилями с пластинами с различными режущими кромками

Table 3

The results of studying the peat soil cutting forces by cutting profiles with the plates of different cutting edges

Режущий профиль	Форма кромки режущей пластины	Усилие резания, Н			Дисперсия, Н ²	С.К.О, Н
		расчет	эксперимент	модель		
Прямой	Прямая	137,8	135,2	134,7	2,70	1,25
	Трапецевидная	126,3	123,6	125,1	1,84	0,95
	Овальная	117,7	112,8	115,9	6,18	1,79
	Треховальная	97,7	95,6	96,3	1,13	0,76
С провисом	Прямая	125,3	126,4	125,4	0,35	0,45
	Трапецевидная	111,6	112,3	115,8	5,28	1,75
	Овальная	103,1	100,4	96,6	10,34	2,25
	Треховальная	87,2	89,4	87,1	1,69	0,99

ко всей площади поперечного сечения срезаемого слоя и наличия плавно расширяющихся кверху боковых поверхностей.

При оснащении режущих профилей пластиной с трёхвальной режущей кромкой отмечается снижение усилия резания торфяного грунта до 30% по сравнению с пластиной с прямой режущей кромкой. Трёхвальная режущая кромка пластины характеризуется более низким значением коэффициента скользящего резания ($k_{скр} = 0,76$) за счет выпирающей центральной части, которая приводит к более интенсивному изменению угла τ со смещением торфяного грунта вдоль кромки и увеличением участка скользящего резания.

Обосновано техническое решение конструкции ковша экскаватора для выемки торфяного сырья, выполненного в форме режущего профиля с провисом и уставленной на нем пластиной с трехвальной режущей кромкой, в результате чего снижение усилия резания торфяного массива достигает 35% в сравнении со стандартным ковшом [35].

Выводы

В ходе анализа технологических требований и критериев для выемки торфяного сырья карьерным способом установлено, что выемку торфяного сырья следует осу-

ществлять гидравлическим экскаватором с откоса карьера, коэффициент заложения которого равен 1:1, со всей глубины торфяной залежи с постоянной толщиной срезаемого стружки 0,16 м. С учетом проходимости по слабым грунтам и низкой плотности торфяной залежи для выемки торфяного сырья был определен универсальный гидравлический экскаватор 3-й размерной группы, массой 10–18 т, с шириной гусениц 1,5 м, оборудованный ковшом шириной 1,4 м вместимостью 1,25 м³.

Аналитически установлено, что на сопротивление торфяного грунта резанию влияют форма режущего профиля ковша и форма пластины с режущей кромкой, которые характеризуются коэффициентом скользящего резания $k_{скр}$ и коэффициентом профиля ковша $k_{прф}$. На основе полного многофакторного эксперимента получена математическая модель усилия резания торфяного грунта $P_{рез}$ от основных факторов: коэффициента скользящего резания $k_{скр}$ и коэффициента профиля ковша $k_{прф}$, по которой предварительно оценивается усилие резания торфяного грунта ковшом экскаватора. Обоснованы рациональные параметры ковша экскаватора, оборудованного режущей пластиной с провисом и трехвальной режущей кромкой, в результате чего сопротивление резанию торфяного грунта снижается на 35% по сравнению со стандартным ковшом.

Список литературы / References

1. Kremcheev E.A., Nagornov D.O. Features of structure of process operations set during peat excavation with staged dehydration. *Ecology, Environment and Conservation*. 2017;23(2):956–965. Available at: https://envirobiotechjournals.com/issues/article_abstract.php?aid=7867&iid=230&jid=3 (accessed: 25.04.2026).
2. Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Технологические требования к процессу измельчения экскавированного органического сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):85–99. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_85
Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):85–99. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_85
3. Хамидов О.У., Шибанов Д.А. Техническое обслуживание и ремонт карьерных экскаваторов по регламенту с учетом фактических условий и режимов их эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):152–167. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_152
Khamidov O.U., Shibonov D.A. Regulated maintenance and repair of quarry excavators considering real-world conditions and operating modes. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):152–167. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_152



4. Власов В.П. *Технология производства кускового торфа*. М.: Недра; 1974. 152 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-tehnologiyaproizvodstvakuskovogotorfa.pdf> (дата обращения: 25.04.2026).
5. Иванов В.В., Дзюррич Д.О. Обоснование параметров технологической схемы разработки обводненных месторождений строительного песка. *Записки Горного института*. 2022;253:33–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3>
Ivanov V.V., Dzyurich D.O. Justification of the technological scheme parameters for the development of flooded deposits of construction sand. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:33–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3>
6. Hoosten H., Clarke D. (eds) *Wise use of mires and peatlands. Background and principles including a framework for decision making*. International Peat Society; International Mire Conservation Group; 2002. 324 p.
7. Moosavi E., Gholamnejad J. Optimal extraction sequence modeling for open pit mining operation considering the dynamic cutoff grade. *Journal of Mining Science*. 2016;52(5):956–964. <https://doi.org/10.1134/S1062739116041465>
8. Васильев Д.А., Ракитин И.В., Игнатьев С.А., Большунов А.В., Ожигин А.Ю. Анализ ледяного шлама, полученного при бурении снежно-фирновой толщи на станции Восток. *Лёд и снег*. 2025;65(2):357–372. Режим доступа: <https://ice-snow.igras.ru/jour/article/view/1556> (дата обращения: 25.04.2026).
Vasilev D.A., Rakitin I.V., Ignatev S.A., Bolshunov A.V., Ozhigin A.Y. Analysis of ice cuttings collected during drilling of the snow-firn layer at Vostok station. *Ice and Snow*. 2025;65(2):357–372. (In Russ.) Available at: <https://ice-snow.igras.ru/jour/article/view/1556> (accessed: 25.04.2026).
9. Sato M., Tsunano Y., Sano K., Warisawa S., Aizawa M., Nishimura K., Fukui R. Evaluation of excavation motion sequence for hydraulic excavators based on extraction of excavation style and phase. *Journal of Field Robotics*. 2022;39(7):1110–1120. <https://doi.org/10.1002/rob.22090>
10. Meagher C., Dimitrakopoulos R., Vidal V. A new approach to constrained open pit pushback design using dynamic cut-off grades. *Journal of Mining Science*. 2014;50(4):733–744. <https://doi.org/10.1134/S1062739114040140>
11. Лавренко С.А., Шорников В.В., Ботян Е.Ю., Пушкарев А.Е., Шмидт И.В. Взвешивание самосвалов как инструмент повышения эффективности эксплуатации погрузочно-доставочной техники. *Горная промышленность*. 2025;(1S):81–85. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-81-85>
Lavrenko S.A., Shornikov V.V., Botyan E.Yu., Pushkarev A.E., Shmidt I.V. Weighing of dump trucks as a tool to improve the operating efficiency of loading and hauling equipment. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):81–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-81-85>
12. Manríquez F., González H., Morales N. Short-term open-pit production scheduling optimizing multiple objectives accounting for shovel allocation in stockpiles. *Optimization and Engineering*. 2023;24(1):681–707. <https://doi.org/10.1007/s11081-021-09701-4>
13. Kravets S., Suponyev V., Goponov A., Kovalevskiy S., Koval A. Determining efficient operating modes and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020;4(1):23–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208957>
14. 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>
15. Burt C.N., Caccetta L. Equipment selection for surface mining: A review. *Interfaces*. 2014;44(2):143–162. <https://doi.org/10.1287/inte.2013.0732>
16. Михайлов А.В., Смирнов А.И., Ал-Аттар М.Т. Анализ технологических требований к карьерной выемке органогенного материала. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2025;(31):119–124. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2025-31-119-124>
Mikhailov A.V., Smirnov A.I., Al-Attar M.T. Analysis of technological requirements for organogenic material open-pit excavation. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2025;(31):119–124. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2025-31-119-124>
17. Babyr N.V., Kuziev D.A., Szankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 17.04.2026).
18. Джураев Р.У., Райханова Г.Е., Губанов С.Г. Совершенствование конструкции режущих элементов ковша карьерных экскаваторов. *Горный журнал*. 2023;(3):49–55. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.03.07>
Dzhuraev R.U., Raikhanova G.E., Gubanov S.G. Design improvement for cutting elements of excavator buckets. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(3):49–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.03.07>
19. Maksarov V.V., Sinyukov M.S. Methods of ensuring the quality of assembly of non-removable joints from dissimilar materials. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2026;39(5):1191–1199. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.05b.12>
20. Тюрменов С.Н., Ларгин И.Ф., Ефимова С.Ф., Скобеева Е.И. *Торфяные месторождения и их разведка*. М.: Недра; 1977. 264 с.
21. Drebenstedt C. The responsible mining concept – contributions on the interface between science and practical needs. In: Drebenstedt C., Singhal R. (eds) *Mine Planning and Equipment Selection: Proceedings of the 22nd MPES Conference, Dresden, 14–19 October 2013*. Cham: Springer; 2014, pp. 3–24. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_1



22. Turdiyev S.A., Djuraev R.U., Zhuraev A.S. Experimental and test study of the effectiveness of the improved design of the excavator bucket jaw plate. *Central Asian Research Journal for Interdisciplinary Studies*. 2022;2(3):214–222.
23. Khedkar Y., Nagpure H., Dendage P., Shinde P., Naikavade S., Dey T. The evaluation of forces acting on excavator bucket and its capacity. *Materials Today: Proceedings*. 2022;68(Pt. 6):2591–2596. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.013>
24. Амарян Л.С. *Свойства слабых грунтов и методы их изучения*. М.: Недра; 1990. 220 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/33899> (дата обращения: 25.04.2026).
25. Пашкевич М.А., Данилов А.С. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. *Записки Горного института*. 2023;260:153–154. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16233> (дата обращения: 25.04.2026).
Pashkevich M.A., Danilov A.S. Ecological security and sustainability. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:153–154. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16233> (accessed: 25.04.2026).
26. Плащинский В.А., Шешукова Е.И., Салимов А.Э., Шибанов Д.А., Иванов С.Л. Численное моделирование процесса копания ковшем экскаватора методом дискретных элементов. *Горная промышленность*. 2025;(4):144–150. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-144-150>
Plaschinsky V.A., Sheshukova E.I., Salimov A.E., Shibyanov D.A., Ivanov S.L. Numerical simulation of the digging process with an excavator bucket using the discrete element method. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):144–150. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-144-150>
27. Лазарев А.В., Корчунов С.С. (ред.) *Справочник по торфу*. М.: Недра; 1982. 760 с.
28. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Установление максимальной жесткости упругодемпфирующего устройства в механизме тяги драглайна. *Горный журнал*. 2021;(5):79–83. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.05.09>
Klementieva I.N., Kuziev D.A. Maximal stiffness of elastically damping device in traction of draglines. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(5):79–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.05.09>
29. Raykhanova G.Y., Djuraev R.U., Turdiyev S.A. Development of a new design of cutting elements for quarry excavator buckets and results of its experimental research. *The American Journal of Engineering and Technology*. 2022;4(4):68–78. Available at: <https://theamericanjournals.com/index.php/tajet/article/view/3629> (accessed: 27.04.2026).
30. Габов В.В., Задков Д.А., Прялухин А.Ф., Садовский М.В., Молчанов В.В. Совершенствование конструкции шнекового исполнительного органа очистного комбайна. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):51–71. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_51
Gabov V. V., Zadkov D. A., Pryaluhin A. F., Sadovsky M. V., Molchanov V. V. Mining combine screw executive body design. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):51–71. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_51
31. 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>
32. Федоров Д.И. *Рабочие органы землеройных машин*. М.: Машиностроение; 1977. 288 с.
33. Резник Н.Е. *Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов*. М.: Машиностроение; 1975. 311 с.
34. Gabov V.V., Zadkov D.A. Peculiarities of stress field formation during cutting isotropic material by mining machine cutters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87(2):022007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022007>
35. Казаков Ю.А., Михайлов А.В., Смирнов А.И. *Ковш экскаватора для выемки слабого грунта*. Патент на полезную модель RU234222U1 Российская Федерация. Оpubл. 22.05.2025. Режим доступа: https://viewer.rusneb.ru/ru/000224_000128_0000234222_20250522_U1_RU (дата обращения: 25.04.2026).

Информация об авторах

Михайлов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0516-7737>; e-mail: Mikhaylov_AV@pers.spmi.ru
Смирнов Андрей Игоревич – аспирант кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0004-5609-9246>, e-mail: a.s.555@inbox.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.06.2026
Поступила после рецензирования: 29.07.2026
Принята к публикации: 17.08.2026

Information about the authors

Aleksander V. Mikhailov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0516-7737>
Andrey I. Smirnov – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0004-5609-9246>; e-mail: a.s.555@inbox.ru

Article info

Received: 14.06.2026
Revised: 29.07.2026
Accepted: 17.08.2026