ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-3):85—99
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 62–1/–9; 62–252.2 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_85

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЦЕССУ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЭКСКАВИРОВАННОГО ОРГАНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Ю. А. Казаков[1], Г. С. Козачков[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, 199106, Россия, Kazakov_YuA@pers.spmi.ru

Аннотация: Определены проблемы добычи полезных ископаемых (ПИ) в осложненных горно-геологических условиях месторождений органогенных горных пород на примере торфяных месторождений, как следствие, установлена необходимость внутрикарьерной переработки органогенного сырья, в частности, торфяного. Комплексное рациональное освоение месторождений ПИ в осложненных горно-геологических условиях торфяных месторождений, достигается за счет обеспечения внутрикарьерной переработки экскавированного органогенного сырья измельчением для получения сопутствующего продукта в рамках реализации технологии IPCC (In-pit Crushing and Conveying). В статье дан анализ экскавированного торфяного сырья, определены размерно-массовые и физико-механические характеристики характерных фрагментов стружки торфяного сырья, полученных на месторождении Заозерское (№ 1021) Ломоносовского района, Ленинградской области. Определены требования к геометрическим характеристикам торфяного продукта на выходе из мобильного модуля измельчения органогенного экскавированного сырья. Выбрана теория для расчета энергозатрат на измельчение упруго-вязкопластичного органогенного сырья с учетом размерности измельчения. Приведен анализ способов измельчения сырья и измельчающего оборудования, в котором данные способы реализованы для выбора рационального способа измельчения органогенного экскавированного сырья. На основе полученных выводов выбрано резание как способ для измельчения экскавированного органогенного сырья фрезерным барабанным рабочим органом мобильного модуля измельчения, обеспечивающий сепарацию древесных включений и диспергирование состава смеси. Обоснованы технологические требования к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья и сформулированы положения для дальнейшего исследования.

Ключевые слова: Рациональное природопользование, внутрикарьерное обогащение, измельчение органогенного сырья, органогенное экскавированное сырье, фрезерование торфяного сырья, диспергирование, мобильный модуль измельчения, процесс резания, технологические требования.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW–2023–0002 Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов).

Для цитирования: *Казаков Ю. А., Козачков Г. С.* Технологические требования к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 12-3. — С. 85—99. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_85.

Technological requirements for the processing of excavated organic raw material

Yu. A. Kazakov[1], G. S. Kozachkov[1]

[1] Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, 199106, Russia, Kazakov_YuA@pers.spmi.ru

Abstract: The challenges of mineral resource (MR) extraction in complex mining and geological conditions of organogenic rock deposits are identified, using peat deposits as an example. Consequently, the necessity of in-pit processing of excavated organogenic raw materials, particularly peat, is established. Integrated rational development of MR deposits in the complex geological environments of peat fields is achieved through in-pit processing of excavated organogenic raw materials via crushing to produce a by-product, utilizing the IPCC (In-pit Crushing and Conveying) technology. This article analyzes excavated peat raw material, determining the size-mass and physico-mechanical characteristics of typical peat shavings obtained from the Zaozerskoye deposit (No. 1021) in the Lomonosov District of the Leningrad Region. Requirements for the geometric parameters of the peat product at the output of the mobile organogenic raw material crushing module are defined. A theoretical basis for calculating energy consumption during the crushing of elastic-viscoplastic organogenic raw material, considering the dimensionality of the crushing process, is selected. An analysis of crushing methods and equipment is provided, with these methods serving to identify the optimal approach for processing excavated organogenic raw materials. Based on the findings, cutting using a drum milling working unit of the mobile crushing module is chosen as the preferred method, ensuring separation of woody inclusions and dispersion of the mixture composition. Technological requirements for the crushing process of excavated organogenic raw materials are substantiated, and key provisions for further research are formulated.

Key words: Rational use of natural resources, in-pit processing, crushing of organogenic raw material, excavated organogenic raw material, milling of peat raw material, dispersion, mobile crushing module, cutting process, technological requirements.

Acknowledgements: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRW-2023–0002).

For citation: Kazakov Yu. A., Kozachkov G. S. Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-3):85–99. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_85.

Введение

Комплексное освоение месторождений полезных ископаемых — стратегическое направление развития горнодобывающей промышленности, позволяющее обеспечить устойчивое экономическое развитие путем рационального использования ресурса недр [1, 2, 3].

На территории России 21% территории занимают грунты со слабой несущей способностью. Из них 7% приходится на органогенные горные породы в том числе и торф. Добыча полезных ископаемых на этих территориях затруднена сложившимися горно-геологическими условиями. При освоении месторождений ПИ наиболее осложненными условиями представляются торфяные месторождения [4].

Так, например в Западной Сибири, торфяные грунты препятствуют доступу тяжелой техники при освоении нефтяных месторождений, требующих

осушения, корчевания растительности и выравнивание рельефа, что увеличивает затраты. Также торфяники маскируют подстилающие породы, что усложняет геологоразведку, так в Кемеровской области в торфяных залежах были случайно обнаружены золото и серебро [5,6]. Осушение торфяных болот с образованием отвалов торфяного сырья для доступа к продуктивным пластам увеличивает риски пожара, например в 2020–2023 гг. пожары в Томской области уничтожили 12 тыс. Га лесов. Торфяники снижают рентабельность нефтяных и газовых месторождений, на Васюганском болоте добыча возможна только локально из-за необходимости сохранения экосистемы [7]. На Северо-Западе России болота мешают разработке бокситов (Тихвинское месторождение) и фосфоритов. Для их преодоления используют насыпные дороги-лежнёвки, что удорожает логистику [8].

Примеры добычи полезных ископаемых на территории, покрываемой торфяниками, показывают потенциал для организации на них вспомогательного технологического процесса для добычи торфяного сырья с целью использования как сопутствующего продукта в соответствии со стратегией развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года [9, 10].

Использование торфяного сырья как дополнительного продукта при добыче разнообразных полезных ископаемых в России уже применяется, улучшая экономику проектов, снижая природоохранные риски благодаря рекультивации земель на отработанных участках [11, 12]. Так, в нефтегазовом секторе торфяные гранулы из отвалов используют для сбора нефтепродуктов при авариях. На месторождениях ХМАО компании закупают торфяные сорбенты у местных производителей, что дешевле импортных аналогов на 30–40% [13, 14].

Торфяно-глинистые смеси применяют для укрепления стенок нефтяных отстойников, предотвращая загрязнение грунтовых вод [15]. При разработке рассыпных месторождений золота торф из вскрышных отвалов передают агропредприятиям, которые смешивают торфяное сырье с почвой для восстановления растительности. Затраты на рекультивацию снижаются при использовании торфяного сырья. Также после обработки торфяного сырья щелочью производят гуминовые удобрения [16]. Торф, извлеченный при вскрыше угольных разрезов, прессуют в топливные пеллеты для котельных. В Кемеровской области такое топливо заменяет 15% угля, снижая выбросы серы при сжигании [17]. Торфяно-зольные смеси из отходов обогащения угля используют для производства теплоизоляционных плит. При освоении алмазных месторождений им. Ломоносова в Архангельской области вскрышные торфяные отвалы перерабатывают в сырье для озеленения городских территорий. К настоящему моменту налажен выпуск 50 тыс. т продукции в год [16]. На Мезенском месторождении в Калининградской области из вскрыши янтарной добычи производят топливные гранулы, используемые для отопления [18].

Для использования торфяного сырья как дополнительного продукта при добыче полезных ископаемых предлагается применяемая в горной промышленности технология внутрикарьерного измельчения и транспортирования (IPCC). Технология IPCC подходит для экскавации и переработки органогенного сырья непосредственно на месторождениях. Ключевым оборудованием

в предлагаемой технологии является измельчитель [19].

В рамках технологической схемы IPCC, основанной на поэтапном перемещении сырья, реализован принцип технологического разрыва. После экскавации торфяное сырье помещается в промежуточный штабель, что позволяет независимо эксплуатировать добывающее и перерабатывающее оборудование без синхронизации их рабочих режимов. Совместное перемещение модуля измельчения вдоль фронта работ с корректировкой положения штабелей минимизирует простои, связанные с передислокацией техники. Решения позволили оптимизировать логистику: мобильная конструкция измельчителя сокращает путь транспортировки влажного торфяного сырья, сохраняя при этом устойчивость на грунтах с низкой несущей способностью за счёт лыжной ходовой части [20].

Идея работы заключается в применении процесса измельчения органогенного экскавированного сырья при добыче полезных ископаемых для использования его в качестве сопутствующего продукта. Измельчение органогенного сырья на месторождении улучшает качество готового продукта, а его использование обеспечивает полное освоение ресурса залежи.

Целью работы является обоснование технологических требований к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья для рационализации его внутрикарьерного обогащения, направленного на получения сопутствующей продукции.

Методы

Определение технологических требований к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья и их обоснование включает: определение физико-механических и размерно-массовых характеристик сырья, выбор рационального способа измельчения органогенного сырья и анализ существующего измельчающего оборудования.

В качестве образцов для анализа использовалось экскавированное торфяное сырье с месторождения Заозерское (№ 1021) Ломоносовского района, Ленинградской области.

При экскавации торфяного сырья ковшом шириной 1,5 м с откоса карьера глубиной 2,2 м снимается стружка с одновременным усреднением в ковше экскаватора, стружка раскалывается на фрагменты, разгружающиеся в штабель и составляющие массив частично нарушенной структуры (рис. 1).

При срезании стружки с откоса карьера происходит первичное естественное усреднение материала, в результате чего в состав входит торфяное сырье с различной степенью разложения и плотностью. На месторождении Заозерское залежь глубиной 2,2 м представлена фускум торфом.

Массив экскавированного торфяного сырья частично нарушенной структуры исследован на степень разложения, насыпную плотность, засоренность древесными включениями и влажность (табл. 1).

Проведены замеры 20 характерных образцов, образующих массив экскавированного торфяного сырья частично нарушенной структуры произвольной формы по трем сторонам, образующим приведенный параллелепипед. Результат статистического анализа размерно-массовых характеристик стружки торфяного сырья представлен в табл. 2.

Статистический анализ показал, что коэффициент вариации < 33%, значит размерно-массовые характеристики фрагментов стружки торфяного сырья подчиняются закону нормального распределения. Определены характерные

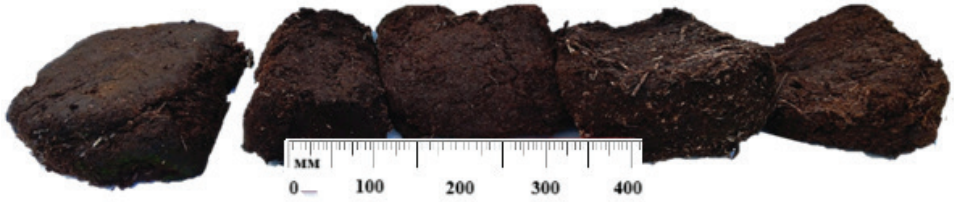

Рис. 1. Фрагменты стружки торфяного экскавированного сырья [составлено авторами]
Fig. 1. Fragments of excavated peat raw material shavings [compiled by the authors]

Таблица 1

Физико-механические характеристики массива торфяного сырья частично нарушенной структуры [составлено авторами]
Physical and mechanical properties of a peat raw material deposit with a partially disturbed structure [compiled by the authors]

Степень разложения R, %	25
Плотность насыпная ρ, кг/м^3	754
Засоренность древесными включениями, %:	1,1
Влажность w, %	86

Таблица 2

Статистический анализ размерно-массовых характеристик фрагментов стружки торфяного сырья [составлено авторами]
Statistical analysis of size and mass characteristics of peat raw material shaving fragments [compiled by the authors]

	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Масса, кг
Математическое ожидание	273	229	108,8	3,4
Медиана	270	235	107	3,2
Стандартное отклонение	36	48	27	0,9
Коэффициент вариации, %	13,5	20,6	25,3	28,5
Минимум	210	150	70	2,3
Максимум	340	310	160	5,4

размерно-массовые характеристики фрагментов стружки, образованной при срезании и первичном перемешивании сырья в ковше экскаватора и выгрузке в штабель, выраженные математическим ожиданием [21].

Оценить состояние сырья на данном и последующих этапах переработки можно при помощи показателя степени механической переработки λ — это показатель, характеризующий интенсивность воздействия на материал. Он определяется как интегральная величина деформаций, возникающих при механическом воздействии. Этот параметр важен для оценки эффективности технологического процесса измельчения. Чем выше значения λ, тем выше качество конечного продукта за счет разрушения волокнистой структуры и высвобождения связанной воды. Исследования показывают, что увеличение степени переработки на 15–20% позволяет снизить энергозатраты

на последующие операции и повысить производительность оборудования [22].

Степень механической переработки торфяного сырья после экскавации и хранения в штабеле определяется выражением:

$$\lambda = S_2 / S_1, \quad (1)$$

где S_2 — удельная поверхность фрагментов стружки, м^2/кг; S_1 — удельная поверхность срезаемого слоя, м^2/кг.

В технологии IPCC после выемочной операции по принципу технологического разрыва применяется промежуточный отвал, в котором скапливаются фрагменты органогенного сырья без изменения структуры и размеров. За счет гравитационного воздействия при выдерживании в штабеле влажность фрагментов снижается не более чем на 1% [23].

Первично перемешенное и отсортированное от крупных древесных включений торфяное сырье не готово для использования в качестве дополнительного продукта, наличие в составе мелких древесных включений и неоднородность структуры требуют измельчения, сепарации и диспергирования. Выполнение этих операций в сочетании увеличивает степень механической переработки для получения универсальной продукции различного назначения от топлива до удобрений. Для получения универсального обогащенного торфяного сырья посредством внутрикарьерной переработки необходимо учитывать рациональное значение толщины стружки после измельчения, что продиктовано наименьшим значением = 2,4, определенным на месторождении при экскавации торфяного сырья.

Рациональные размерные параметры измельченного сырья определяются требованием равномерного испарения влаги из всего объема материала, достигающегося при толщине стружке не более 50 мм. Также, для предотвращения разрушения кусков при транспортировке рациональное соотношение сторон составляет 1:2, которое определяет вторую сторону параллелепипеда фрагмента стружки — не более 100 мм. Это обеспечивает механическую устойчивость и равномерное распределение напряжений [22, 24]. Согласно статистическому анализу размерно-массовых характеристик фрагментов стружки торфяного сырья минимальный размер третьей стороны, определяющийся длиной поступающего на измельчение фрагмента стружки, составляет 340 мм.

Измельчение упруго-вязко-пластичных материалов, таких как торф — сложный процесс, требующий учета реологических свойств веществ. Такие материалы сочетают высокую степень вязкости и пластичности, что затрудняет их измельчение. Существующие теории разрушения позволяют определить рациональный способ измельчения только с ограничениями и требуют экспериментальных подтверждений [25].

Однако для определения параметров грубого измельчения можно использовать теорию Кирпичева-Кика (объемная гипотеза). Согласно этой гипотезе, энергия, затрачиваемая на измельчение, пропорциональна объёму или массе материала, что актуально при грубом измельчении, где преобладают процессы деформации и разрушения крупных кусков. Для торфа, особенно при начальных стадиях переработки внутри карьера, это означает, что основная работа направлена на преодоление объёмных сопротивлений [26]. Использование объемной гипотезы позволяет провести оценку энергозатрат при измельчении массива торфяного экскавированного сырья до определенных в статье размеров.

Таблица 3
Устройства и способы измельчения [составлено авторами]
Devices and methods for grinding raw material [compiled by the authors]

№	Название	Вид	Способ измельчения
1	Дробилки грубое и среднее дробление твердых материалов (горные породы, руда, строительный мусор).	Щековые Конусные Роторные Молотковые Валковые	Дробление (раздавливание) Механическое разрушение материала между твердыми поверхностями.
2	Мельницы тонкого и сверхтонкого помола (минералы, химические вещества, пищевые продукты).	– Шаровые – Стержневые – Вертикальные роликовые – Струйные – Планетарные	Ударное измельчение Истирание (абразивное измельчение)
3	Ножевые измельчители резанья мягких, волокнистых или пластичных материалов (пластик, дерево, органика).	– Роторно-ножевые – Дисковые мельницы – Шредеры	Режущее измельчение
4	Другие	– Диспергаторы – Блендеры и миксеры	Сдвиговое измельчение

Для реализации измельчения сырья необходимо подобрать рациональный способ измельчения, применяющийся в разнообразных устройствах, которые можно разделить по способу измельчения (табл. 3)

Дробилки применяются для измельчения твердых горных пород, принцип работы таких устройств не подходит для вязко-пластичных материалов. Мельницы, использующие абразивное измельчения не подходят для торфяного сырья в силу его низкой абразивности. Принцип работы ножевых измельчителей подходит для свойств торфяного сырья, но применяемые устройства не позволяют достичь требуемых размерных параметров. Устройства, реализующие сдвиговое измельчение в совокупности с режущим измельчением, подходят для реализации функции диспергирования, и измельчения сырья до заданных параметров [27, 28].

Анализ показал, что рациональным способом измельчения торфяного экскавированного сырья является резание. Объединив функции ножевых измельчителей и диспергаторов, можно добиться заданных параметров конечного продукта.

Результаты

Технология IPCC рациональна для использования в качестве дополнительного технологического процесса для создания торфяного полуфабриката как сопутствующего продукта при добыче залегающих под органогенным сырьем полезных ископаемых.

Использование мобильного измельчающего оборудования с многофункциональным рабочим органом позволяет добиться рациональной степени переработки торфяного сырья внутри карьера для последующего использования торфяного продукта [29].

Анализ сырья, поступающего в измельчающее оборудование, определение параметров продукта после измельчения, анализ теории разруше-

ния Кирпичева-Кика и измельчающего оборудования показал рациональным способом измельчения — резание, совмещенное со сдвиговым измельчением.

В статье предлагается использовать фрезу в виде конического полого барабана с проходными ножами в составе мобильного модуля для измельчения сырья. Устройства с аналогичным рабочим органом применяются в сельском хозяйстве для измельчения кормов [30].

Фронтальный погрузчик загружает торфяное сырье из штабеля в бункер мобильного модуля измельчения. Движение насыпного материала в бункере-накопителе происходит под действием сил гравитации, и вертикальное давление является основным фактором, под действием которого формируется все поле давления на фрезерный барабан. При фрезеровании торфяного сырья фрезой в качестве подвижной принята поверхность барабанной фрезы с режущими элементами, а в качестве неподвижной — нижняя фрезеруемая поверхность торфяного сырья в бункере-накопителе (рис. 2).

Торфяная залежь является связным грунтом. Основным условием прочности или предельного состояния органоминеральных грунтов является условие Кулона-Мора (2) [14,30]:

$$\tau = C + \sigma \mathrm{tg}\phi, \qquad (2)$$

где τ — величина касательных напряжений, кПа; C — величина сцепления грунта, кПа; σ — величина нормальных напряжений на грунт, кПа; ϕ — угол внутреннего трения грунта, град.

При анализе процесса резания экскавированное торфяное сырье ненарушенной структуры рассматривается пластической средой, следовательно, его прочность определяется наличием угла внутреннего трения ϕ и сцепления между частицами C.

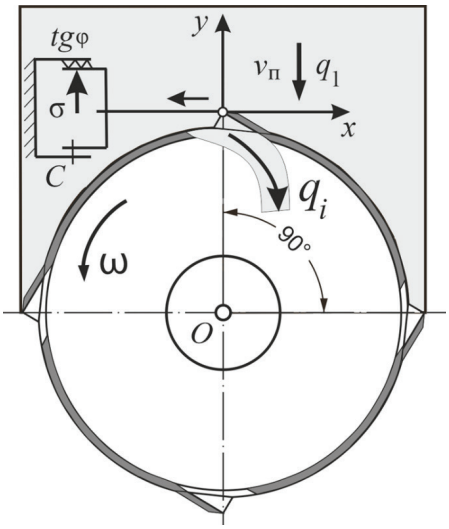

Рис. 2. Схема модели процесса резания массы проходным ножом измельчителя [составлено авторами]
Fig. 2. Schematic diagram of the model for the cutting process of bulk material by a traversing blade in a crusher [compiled by the authors]

Перед ножом имеется некоторый массив сырья, в котором деформация сдвига на произвольной площадке представлена линейной функцией нормального напряжения (3) [31, 32]:

$$\sigma = \gamma l^3 / l^2, \qquad (3)$$

где γ — объемный вес грунта, *Н*/м^3; l — обобщенный линейный размер объекта, м.

В этом случае выражение Кулона-Мора принимает вид:

$$\tau = C + \gamma \mathrm{tg}\phi, \qquad (4)$$

где ϕ — коэффициент внутреннего трения среды, определяющий конусность рабочего органа измельчителя (фрезерного барабана).

В процессе механической переработки торфяного сырья происходит сдвиг на внутренней стенке проходных ножей и на поверхности барабана. Срезанный материал поступает в полость барабана в виде стружки прямоу-

гольного сечения, которая ломается на фрагменты, и измельченная масса удаляется из полости конического барабана под действием силы тяжести.

Коническая вращающаяся фреза выполняет функцию диспергирования торфяного сырья, попавшего в барабан. Функцию сепарации древесных включений выполняют проходные ножи, которые выталкивают мелкие древесные включения из бункера, превышающие размер, отверстия в барабане. Древесные включения, попадающие внутрь барабана, перемешиваются с торфяным сырьем, что не снижает качества получаемого материала.

Степень механической переработки торфяного сырья фрезерным барабаном будет зависеть от следующих основных факторов: окружная скорость фрезы и поступательная скорость материала, их соотношение, диаметр фрезы, толщина вырезаемой стружки, число ножей, угол контакта фрезы с массой. При увеличении скорости вращения фрезы и уменьшении поступательной скорости степень переработки возрастает. Увеличение числа ножей в плоскости резания положительно влияет на степень переработки. Чем большей степени измельчения подвергается торфяное сырье перед формованием, тем меньше общая затрата энергии на его переработку. Это подтверждает эффективность применения интенсивной механической переработки при добыче торфа. Полученные результаты позволяют на стадии проектирования определить необходимые параметры фрезы для достижения заданной степени переработки [33, 34].

Обсуждение результатов

В результате анализа способа измельчения органогенного экскавированного сырья сформулированы требования выдвигаемые к процессу его измельчения.

1. Экскавация торфяного сырья с выгрузкой в промежуточный штабель, с последующей перегрузкой сырья погрузчиком в бункер мобильного модуля измельчения, что является требованием к началу процесса измельчения, обеспечивающее независимость рабочих режимов измельчителя от экскаватора.

2. Размерные параметры измельченного сырья: параллелепипеды с сечением равным 50 на 100 мм. Стружка данного сечения является рациональной и обеспечивает универсальность последующего использования продукта и способов дальнейшей переработки (например, обезвоживания).

3. Рациональным способом измельчения органогенного экскавированного сырья является резание. Данный способ измельчения позволяет соблюсти размерные характеристики торфяного полуфабриката после измельчения. Подходит для упруго-вязко-пластичных свойств органогенного сырья.

4. Сепарация древесных включений и усреднение состава готового продукта. Качество конечного торфяного полуфабриката определяется наличием в составе древесных включений и степенью диспергирования сырья. Выбранный способ и устройство измельчения позволяют удалить древесные включения. При вращении измельченного торфяного сырья внутри барабана происходит перемешивание и усреднение состава смеси, поступающей из штабеля.

Конструктивные параметры фрезерного рабочего органа влияют на степень механической переработки органогенного сырья. Выбирая требуемую для различных назначений органогенного сырья степень механической переработки, можно задать рациональную энергоэффективность мобильного модуля измельчения.

Фрезерный рабочий орган мобильного модуля измельчения реализует непрерывный процесс измельчения массива частично нарушенной структуры с учетом функционирования внутри карьера, при цикличной загрузке сырья в бункер ковшом погрузчика при осуществлении принципа технологического разрыва в технологии *IPCC*.

Заключение

Выбор технологии IPCC обусловлен высокой влажностью и наличием древесных включений в торфяном экскавированном сырье, которые увеличивают нагрузку на транспортное оборудование, что ведет к увеличению затрат на транспортировку сырья. Принцип технологического разрыва операций экскавации и измельчения обеспечивает преимущества: отсутствие необходимости синхронизации оборудования по производительности; запас экскавированного сырья в штабеле позволяет не останавливать работу измельчителя в случае выхода из строя экскаватора.

Мобильный модуль измельчения реализует резание органогенного экскавированного сырья рабочим органом научно-обоснованного технического решения в виде фрезерного полого конического барабана. Сформулированы требования к процессу внутрикарьерного измельчения органогенного экскавированного сырья: в технологии IPCC следует применять промежуточное штабелирование экскавированного торфяного сырья, что обеспечивает независимость рабочих режимов измельчителя от рабочих режимов экскаватора; рациональными размерными параметрами и формой измельченного сырья является параллелепипед с сечением равным 50 на 100 мм.; определен рациональный способ измельчения — резание; процесс измельчения рекомендовано сочетать с сепарацией древесных включений для производства окускованной продукции непосредственно в комплексно-механизированном карьере с обеспечением заданного качества конечного торфяного полуфабриката.

Обоснованные технологические требования к процессу измельчения органогенного экскавированного сырья являются основой для дальнейших исследований по определению и обоснованию кинематических, геометрических и режимных параметров фрезерного рабочего органа мобильного модуля измельчения при внутрикарьерной переработке органогенного сырья для установления закономерностей процесса разрушения массива экскавированного органогенного сырья частично нарушенной структуры с одновременным усреднением материала и извлечением древесных включений.

Вклад авторов

Казаков Ю. А. — генерация идеи исследования; постановка задачи исследования; фактографический обзор; написание текста статьи.

Козачков Г. С. — выполнение работы по систематизации материала; получение данных для анализа; анализ данных; создание графического материала.

Авторы выражают признательность за помощь коллегам и людям, чей вклад в данную работу носил чисто технический характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Drebenstedt C.* The responsible mining concept — contributions on the interface between science and practical needs. Mine Planning and Equipment Selection, Springer Cham, 2014, pp. 3–24. DOI :10.1007/978—3–319—02678—7_1.

2. *Литвиненко В. С.*, *Петров Е. И.*, *Василевская Д. В.*, *Яковенко А. В.*, *Наумов И. А.*, *Ратников М. А.* Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. — 2023. — № 259. — С. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

3. *Babyr N. V.* Topical Themes and New Trends in Mining Industry: Scientometric Analysis and Research Visualization. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2024;37(02):439–51. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.02B.18.

4. *Бородко А. В.*, *Свешников В. В.* Национальный атлас России: в 4 т. — М.: Роскартография, 2004–2008. — Т. 2–496 с.

5. *Арбузов С. И.*, *Ершов В. В.*, *Рихванов Л. П.*, *Левицкий В. М.* Золото в углях Минусинского каменноугольного бассейна // Известия ТПУ. — 2002. — № 6. — С. 143–165.

6. *Myagkaya, I. N., Lazareva, E. V., Gustaytis M. A.*, *Zhmodik S. M.* (2016). Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: Migration in water flow. Journal of Geochemical Exploration. 2016;(160):16–30. DOI: 10.1016/J.GEXPLO.2015.10.004.

7. *Ovsyannikova V. S.*, *Kharanzhevskaya Yu. A., Sinyutkina A. A.* Post-pyrogenic changes in the microflora and water chemistry of the drained part of the Great Vasyugan Mire (Tomsk Region). Solid Fuel Chemistry. 2024;(58):145–150. DOI: 10.3103/S0361-5219-2402009-5.

8. *Savko A. D.*, *Ovchinnikova M.* Yu. Evolution of bauxite accumulation in the Phanerozoic. Doklady Earth Sciences. 2023;(513 (Suppl 2)). pp. 155–174. DOI: 10.1134/S1028334X23603280.

9. Стратегия развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 4 июля 2023 г. № 1788-р.

10. *Трофимов В. Т.*, *Барабошкина Т. А.*, *Николаева С. К.* Ресурсный потенциал эколого-геологических систем массивов намывных грунтов. Вестник московского университета. Серия 4. Геология. — 2024. — №5. — С. 164–174. DOI: 10.55959/msu0579–9406–4-2024–63–5-164–174.

11. *Liang Shuai-shuai, Zhang Dong-sheng, FAN Gang-wei, Kovalsky Evgeny, Fan Zhanglei, Zhang Lei, Han Xue-sen.* Mechanical structure and seepage stability of confined floor response to longwall mining of inclined coal seam [J]. Journal of Central South University, 2023, 30(9): 2948–2965. DOI:10.1007/s11771–023–5429-y.

12. *Lange I.*, *Kotiukov P.*, *Lebedeva Y.* Analyzing Physical-Mechanical and Hydrophysical Properties of Sandy Soils Exposed to Long-Term Hydrocarbon Contamination. Sustainability. 2023; 15:3599. DOI:10.3390/su15043599.

13. *Ramachandran V.*, *Shriram M. K.*, *Mathew E. R.*, et al. Oil spill remediation and valorization of oil-soaked peat sorbent to biofuel by hydrothermal liquefaction. Biomass Conversion and Biorefinery. 2023; (13):9325–9337. DOI: 10.1007/s13399–021–01887-y.

14. *Bykova M. V.*, *Alekseenko A. V.*, *Pashkevich M. A.* Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes. Environ Geochem Health. 2021; 43:2331–2346. DOI: 10.1007/S10653-020-00802-0.

15. *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. — С. 124–130. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-124–130.

16. *Jahandari S.*, *Tao Z.*, *Chen Z.*, *Osborne D.*, *Rahme M.* Coal wastes: Handling, pollution, impacts, and utilization. The Coal Handbook: Towards Cleaner Coal Utilization.

17. *Vasilevich R.*, *Lodygin E.*, *Abakumov E.* The Molecular Composition of Humic Acids in Permafrost Peats in the European Arctic as Paleorecord of the Environmental Conditions of the Holocene. Agronomy. 2022;12(9):2053. DOI: 10.3390/agronomy12092053.

18. *Abbaspour H.*, *Drebenstedt C.* Truck–Shovel vs. In-Pit Crushing and Conveying Systems in Open Pit Mines: A Technical Evaluation for Selecting the Most Effective

Transportation System by System Dynamics Modeling. Logistics. 2023;(7):92. DOI: 10.3390/LOGISTICS7040092.

19. *Михайлов А. В.*, *Казаков Ю. А.*, *Козачков Г. С.* Особенности размещения модуля измельчения при внутрикарьерной переработке торфяного сырья // Горная промышленность. — 2024. — № 5. — С. 94–100. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-94–100.

20. *Osanloo M.*, Paricheh, M. In-pit crushing and conveying technology in open-pit mining operations: a literature review and research agenda // International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2019, Vol. 34(6), pp. 430–457. DOI: 10.1080/17480930.2019.1565054.

21. *Михайлов А. В.*, *Федоров А. С.* Анализ параметров мундштука шнекового пресса для 3D-экструзии торфяных кусков трубчатого типа // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 351–365. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.4.

22. *Афанасьев А. Е.*, *Чураев Н. В.* Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. — М.: Недра, 1992. — 288 с.

23. *Utenkova T. G.*, *Kremcheev E. A.*, *Nagornov D. O.*, *Ivanov S. L.* Mechanical dewatering of sapropel in its smallscale mining technology. Sustainable Development of Mountain Territories. 2023;15(2):308–316. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-308–316.

24. *Резник Н. Е.* Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. — М.: Машиностроение, 1975. — 311 с.

25. *Горлов И. В.*, *Митусов П. Е.*, *Беляев А. М.* Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Уголь. — 2022. — № 6. — С. 44–47. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-44–47.

26. *Горлов И. В.*, *Митусов П. Е.* Анализ эффективности процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, при проектировании комплексного агрегата для их переработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 4. — С. 47–58. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_47.

27. *Горлов И. В.*, *Митусов П. Е.* Моделирование процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2023. — № 4 (20). — С. 26–36.

28. *Зюзин Б. Ф.*, *Яконовская Т. Б.*, *Жигульская А. И.* Системный подход к развитию классификации торфяных машин и оборудования. Горные науки и технологии. — 2022. — № 7(4). — С. 320–329. DOI:10.17073/2500-0632-2022-06–06.

29. *Юсов Д. С.*, *Иванова П. В.*, *Иванов С. Л.* Систематизация рабочих органов машин глубокого фрезерования // Горная промышленность. — 2024. — № 3. — С. 85–89. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-85–89.

30. Патент РФ № 232986, 31.03.2025. *Михайлов А. В.*, *Казаков Ю. А.*, *Козачков Г. С.* Фрезерный барабан для измельчения сырья. 2025. Бюл. №10.

31. *Шемякин С. А.*, *Шишкин Е. А.* Физико-математическая модель разрушения горных пород зубом фрезерной установки // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 639–647. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.3.

32. *Аксенов В. В.*, *Садовец В. Ю.*, *Пашков Д. А.*, *Захаров А. Ю.* Влияние формы режущей кромки на силу резания ножевым исполнительным органом // Горное оборудование и электромеханика — 2020. — № 1 (147). — С. 30–36. DOI:10.26730/1816-4528-2020-1-30–36.

33. *Опейко Ф. А.* Торфяные машины. — Минск: Вышэйшая школа, 1968. — 408 с.

34. *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(10):108646. DOI:10.1016/J.COMPAG.2024.108646. ГИАБ

REFERENCES

1. Drebenstedt C. The responsible mining concept contributions on the interface between science and practical needs. Mine Planning and Equipment Selection, Springer Cham, 2014, pp. 3–24. DOI :10.1007/978 — 3–319 — 02678 — 7_1.

2. Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V., Naumov I. A., Ratnikov M. A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023;(259):95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

3. Babyr N. V. Topical Themes and New Trends in Mining Industry: Scientometric Analysis and Research Visualization. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2024;37(02):439–51. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.02B.18.

4. Borodko A. V., Sveshnikov V. V. National Atlas of Russia: in 4 vols. Moscow: Roskartografiya, 2004–2008. Vol. 2 496 p. [In Russ].

5. Arbuzov S. I., Ershov V. V., Rikhvanov L. P., Levitskiy V. M. Gold in coals of the Minusinsk Coal Basin. Izvestiya TPU. 2002, no. 6, pp. 143–165. [In Russ].

6. Myagkaya I. N., Lazareva E. V., Gustaytis M. A., Zhmodik S. M. (2016). Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: Migration in water flow. Journal of Geochemical Exploration. 2016;(160):16–30. DOI: 10.1016/J.GEXPLO.2015.10.004.

7. Ovsyannikova V. S., Kharanzhevskaya Yu. A., Sinyutkina A. A. Post-pyrogenic changes in the microflora and water chemistry of the drained part of the Great Vasyugan Mire (Tomsk Region). Solid Fuel Chemistry. 2024;(58):145–150. DOI: 10.3103/S0361-5219-2402009-5

8. Savko A. D., Ovchinnikova M. Yu. Evolution of bauxite accumulation in the Phanerozoic. Doklady Earth Sciences. 2023;(513 (Suppl 2)). pp. 155–174. DOI: 10.1134/S1028334X23603280.

9. Strategiya razvitiya proizvodstva organicheskoj produkcii v Rossijskoj Federacii do 2030 goda (utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 4 iyulya 2023 g. № 1788-r.

10. Trofimov V. T., Baraboshkina T. A., Nikolaeva S. K. The resource potential of ecological and geological systems of alluvial soil arrays. Moscow University Geological Bulletin. 2024;(79):861–871. [In Russ]. DOI: 10.3103/S0145875224700832.

11. Liang Shuai-shuai, Zhang Dong-sheng, FAN Gang-wei, Kovalsky Evgeny, Fan Zhang-lei, Zhang Lei, Han Xue-sen. Mechanical structure and seepage stability of confined floor response to longwall mining of inclined coal seam [J]. *Journal of Central South University,* 2023, 30(9): 2948–2965. DOI:10.1007/s11771–023–5429-y.

12. Lange I., Kotiukov P., Lebedeva Y. Analyzing Physical-Mechanical and Hydrophysical Properties of Sandy Soils Exposed to Long-Term Hydrocarbon Contamination. *Sustainability*. 2023; 15:3599. DOI:10.3390/su15043599.

13. Ramachandran V., Shriram M. K., Mathew E. R., et al. Oil spill remediation and valorization of oil-soaked peat sorbent to biofuel by hydrothermal liquefaction. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023; (13):9325–9337. DOI: 10.1007/s13399–021–01887-y.

14. Bykova M. V., Alekseenko A. V., Pashkevich M. A. Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes. *Environmental Geochemistry and Health*. 2021;(43):2331–2346. DOI: 10.1007/s10653-020-00802-0.

15. 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.]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-124–130.

16. Jahandari S., Tao Z., Chen Z., Osborne D., Rahme M. Coal wastes: Handling, pollution, impacts, and utilization. The Coal Handbook: Towards Cleaner Coal Utilization.

17. Vasilevich, R.; Lodygin, E.; Abakumov, E. The Molecular Composition of Humic Acids in Permafrost Peats in the European Arctic as Paleorecord of the Environmental Conditions of the Holocene. *Agronomy*. 2022;12(9):2053. DOI: 10.3390/agronomy12092053.

18. Abbaspour H.; Drebenstedt C. Truck–Shovel vs. In-Pit Crushing and Conveying Systems in Open Pit Mines: A Technical Evaluation for Selecting the Most Effective Transportation System by System Dynamics Modeling. *Logistics*. 2023;(7):92. DOI: 10.3390/LOGISTICS7040092.

19. 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.]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-94–100.

20. Osanloo M., Paricheh, M. In-pit crushing and conveying technology in open-pit mining operations: a literature review and research agenda. International Journal of Mining, *Reclamation and Environment*, 2019, Vol. 34(6), pp. 430–457. DOI: 10.1080/17480930.2019.1565054.

21. Mikhailov A. V., Fedorov A. S. Analysis of the screw press mouthpiece parameters for 3D extrusion of peat pieces of tubular type. *Journal of Mining Institute* 2021;(249):351–365. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.4.

22. Afanasyev A. E., Churaev N. V. Optimization of Drying and Structure Formation Processes in Peat Production Technology. Moscow: Nedra, 1992. 288 p. [In Russ].

23. Utenkova T. G., Kremcheev E. A., Nagornov D. O., Ivanov S. L. Mechanical dewatering of sapropel in its smallscale mining technology. Sustainable Development of Mountain Territories. 2023;15(2):308–316. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15–2-308–316.

24. Reznik N. E. Theory of Blade Cutting and Fundamentals of Cutting Apparatus Design Moscow, Mashinostroenie, 1975. 311 p.

25. Gorlov I. V., Mitusov P. E., Belyaev A. M. Analysis of crushing process of incompetent rocks. *Ugol'*. 2022;(6):44–47. [In Russ.]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-44–47.

26. Gorlov I. V., Mitusov P. E. Analysis of disintegration efficiency in soft rocks with plastic properties in design of compound assembly for such rock processing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(4):47–58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_47.

27. Gorlov I. V., Mitusov P. E. Modeling of the destruction process of weak rocks with plastic properties. Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2023, no. 4(20), pp. 26–36. [In Russ.]

28. Zyuzin B. F., Yakonovskaya T. B., Zhigulskaya A. I. A systematic approach to the peat machines and equipment classification development. *Mining Science and Technology*. 2022;7(4):320–329. [In Russ.]. DOI :10.17073/2500-0632-2022-06–06.

29. 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.]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-85–89.

30. RF Patent no. 232986, 31.03.2025. Mikhailov A. V., Kazakov Yu. A., Kozachkov G. S. Milling Drum for Raw Material Grinding. 2025. Bull. no. 10. [In Russ].

31. Shemyakin S. A., Shishkin E. A. Physical and mathematical model of rock destruction by a milling machine cutter. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. p. 639–647. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.3.

32. Aksenov V. V., Sadovets V. Yu., Pashkov D. A., Zakharov A. Yu. Influence of the shape of the cutting edge on the cutting force of the knife executive body. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2020, no.1 (147), pp. 30–36. [In Russ]. DOI:10.26730/1816-4528-2020-1-30–36.

33. Opeyko F. A. Peat Machinery. Minsk: Vyshayaya Shkola, 1968. 408 p. [In Russ].

34. 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(10):108646. DOI:10.1016/J.COMPAG.2024.108646.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Казаков Юрий Алексеевич — канд. техн. наук, ассистент, https://orcid.org/0000-0002-7040-5412, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2, Россия, e-mail: Kazakov_YuA@pers.spmi.ru;

Козачков Григорий Сергеевич — аспирант, https://orcid.org/0009-0003-2764-3807, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2, Россия, e-mail: gkozachkov16@mail.ru.
Для контактов: *Казаков Юрий Алексеевич*, e-mail: Kazakov_YuA@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kazakov J. A., Cand. Sci. (Eng.), assistant, https://orcid.org/0000-0002-7040-5412, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,Saint Petersburg, 199106, Vasil'evskij ostrov, 21 linija d. 2, Russia, e-mail: Kazakov_YuA@pers.spmi.ru;
Kozachkov G. S., Ph.D. Student, https://orcid.org/0009-0003-2764-3807, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, 199106, Vasil'evskij ostrov, 21 linija d. 2, Russia, e-mail: gkozachkov16@mail.ru.
Corresponding author: *J. A. Kazakov,* e-mail: Kazakov_YuA@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 08.09.2025; получена после рецензии 17.11.2025; принята к печати 24.11.25.
Received by the editors 08.09.2025; received after the review 17.11.2025; accepted for printing 24.11.25.