

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ НОЖА ПОД УГЛОМ К ОСИ ФРЕЗЕРНОГО БАРАБАНА НА УСИЛИЕ РЕЗАНИЯ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ

Козачков Г.С., Казаков Ю.А., Михайлов А.В., Смирнов А.И.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: рациональное природопользование, добыча торфяного сырья, внутрикарьерная добыча, мобильный модуль измельчения, форма ножа, резание массива торфяного сырья, косое резание, усилие резания.

Аннотация. Использование вскрыши торфяного материала при разработке месторождений ряда полезных ископаемых соответствует принципу рационального природопользования за счет полного использования ресурсов залежи. Для рационализации добычи и первичной переработки экскавированного торфяного сырья в пределах карьера предлагается использовать мобильный модуль измельчения с рабочим органом в виде полого конического фрезерного барабана. Сырье для переработки поступает после выдержки материала в промежуточном штабеле, обеспечивающим соблюдение принципа технологического разрыва между операциями экскавации и измельчения. Фронтальный погрузчик загружает гравитационно обезвоженное сырье из штабеля в бункер модуля измельчения для осуществления косого резания торфяного экскавированного сырья частично нарушенной структуры. При косом резании торфяного сырья энергоемкость процесса резания снижается на 15-40% относительно прямого резания.

INFLUENCE OF THE KNIFE'S ANGULAR POSITION RELATIVE TO THE MILLING DRUM AXIS ON THE CUTTING FORCE IN PEAT RAW MATERIAL MACHINING

Kozachkov G.S., Kazakov Yu.A., Mikhailov A.V., Smirnov A.I.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: rational use of natural resources, peat raw material extraction, in-pit mining, mobile milling module, knife shape, cutting of peat raw material block, oblique cutting, cutting force.

Abstract. Utilizing peat material overburden during the development of certain mineral deposits aligns with the principle of rational resource management by ensuring full utilization of the deposit's resources. To optimize extraction and primary processing of excavated peat raw material within the quarry, a mobile crushing module equipped with a hollow conical milling drum as its working component is proposed. The raw material for processing is fed into the system after a resting period in an intermediate stockpile, which ensures compliance with the technological time lag between excavation and crushing operations. A front-end loader feeds gravity-dehydrated raw material from the stockpile into the crushing module's hopper, enabling oblique cutting of excavated peat raw material with partially disrupted structure. Oblique cutting of peat raw material reduces energy consumption by 15–40% compared to direct cutting.

Введение

Горнодобывающая промышленность является неотъемлемой частью развития современного общества, обеспечивая базовые потребности человечества в сырьевых ресурсах. Глобальные тенденции в горнодобывающей отрасли характеризуются международными потоками ресурсов, необходимостью постоянного совершенствования технологий и потребностью в рациональном природопользовании [1].

Особенности рационального природопользования определяют специфику устойчивого развития горнодобывающей отрасли. Добываемые материалы не могут быть воспроизведены в разумные сроки, поэтому их использование требует особого подхода: добыча производится строго по потребности, материалы напрямую поступают в экономический оборот, необходимо полное использование всех компонентов месторождения [1, 2].

На территории Российской Федерации около 21% территории занимают грунты со слабой несущей способностью, усложняющие доступ к полезным ископаемым. При этом вскрышной слой на территориях, покрытых грунтами со слабой несущей способностью, может являться полезным ископаемым, как, например, торф, занимающий 8% территории РФ.

Добыча торфяного сырья для производства торфяного полуфабриката как сопутствующего продукта при разработке месторождений полезных ископаемых, соответствует принципам рационального природопользования и способствует устойчивому развитию горной отрасли.

Для рационализации производства торфяного сырья предлагается технология внутрикарьерной переработки и транспортирования (IPCC). Экскавация торфяного сырья происходит с откоса карьера в промежуточный штабель для выдержки с целью гравитационного обезвоживания. Затем, сырье из штабеля перемещается посредством фронтального погрузчика в бункер-питатель мобильного модуля измельчения для осуществления косого резания торфяного экскавированного сырья частично нарушенной структуры с дальнейшим транспортированием измельченного и сепарированного органомогенного сырья в штабель для хранения [3].

Исходя из анализа способов измельчения упруго-вязко-пластичного органомогенного сырья, установлена рациональность его измельчения резанием. В соответствии с этим, в качестве рабочего органа мобильного модуля измельчения предлагается полый конический фрезерный барабан с проходными ножами [4].

Для оценки энергоемкости процесса резания необходимо определить рациональную форму и геометрические параметры проходного ножа.

Целью исследования является определение рационального расположения проходного ножа на сегменте фрезерного барабана под углом к оси барабана при резании массива торфяного экскавированного сырья частично нарушенной структуры.

Материалы и методы исследования

При косом резании материала лезвием усилия, создаваемые ножом, распределяются на большую длину режущей кромки относительно прямого резания, за счет этого нагрузка на нож распределяется равномерно, также к резанию материала нормальной силой добавляется боковая сила, материал перемещается относительно лезвия и в боковом направлении, чем обеспечивается снижения критической силы резания.

При косом резании торфяного сырья, поступающего сверху вниз на фрезерный барабан под действием силы тяжести, стружка, отделяемая от массива, проваливается в отверстия на поверхности барабана, что приводит к снижению силы трения стружки о переднюю поверхность режущей кромки проходного ножа [5].

Анализ научных исследований процесса резания грунтов показал, что при блокированном резании (нож полностью погружен в грунт) форма и угол наклона режущей кромки в меньшей степени влияет на силу сопротивления, так как грунт разрушается равномерно по всей поверхности. При врезании в грунт прямые ножи создают большее лобовое сопротивление из-за уплотнения грунта перед режущей кромкой [6].

Напротив, исследования косого резания грунтов показывают снижение энергоемкости процесса на 15-40% по сравнению с прямым, так как с увеличением угла заключенного между направлением движения рассматриваемой точки лезвия и нормалью к лезвию, проходящей через эту точку – угла скольжения τ облегчается проникновение ножа в материал объясняющееся перепиливающим действием лезвия [5].

Для определения влияния косого резания на энергоемкость процесса применительно к резанию торфяного сырья проведены экспериментальные исследования.

На подготовительном этапе разработана методика проведения экспериментальных исследований, заготовлен массив экскавированного торфяного сырья частично нарушенной структуры состоящий из верхового фускум торфа. Определена насыпная плотность $\rho = 754 \text{ кг/м}^3$, степень разложения $R = 25\%$ и влажность материала $w = 86\%$. Испытуемый образец сырья помещается в контейнер с габаритными размерами 40x30x25 мм.

Модели ножей с габаритными размерами 180x80 мм выполнены из стального листа марки Ст3 толщиной 5 мм. Модели имеют одинаковую двустороннюю заточку режущей кромки с углом равным 20° . Модели ножей отличаются углом наклона режущей кромки: 90° , 45° и 30° соответственно (рис. 1).

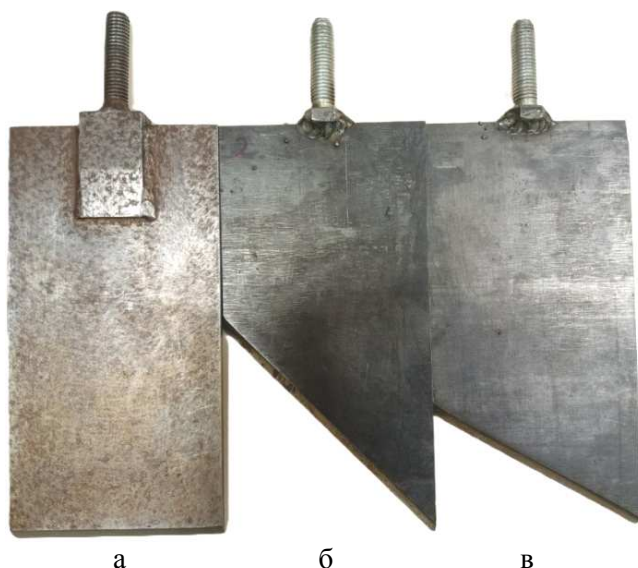


Рис. 1. Модели ножей: а) прямой нож 90°; б) нож с углом наклона режущей кромки 45°; в) нож с углом наклона режущей кромки 30°

Экспериментальные ножи закрепляются в державке универсальной испытательной машины Zwick/Roell Z100 (рис. 2). Установка оснащена датчиком, определяющим усилие $F_{\text{макс}}$ до 100 кН. Скорость траверсы $V_{\text{мин}}$ от 0,00005 мм/мин до $V_{\text{макс}} = 200$ мм/мин [7].

Каждый нож поочередно внедрялся в массив торфяного сырья с одинаковой скоростью и в автоматическом режиме строился график зависимости усилия внедрения от угла наклона режущей кромки ножа.

Результаты

В результате испытаний резания ножами массива торфяного сырья частично нарушенной структуры построен сводный график зависимости усилий от угла наклона режущей кромки ножа (рис. 3).

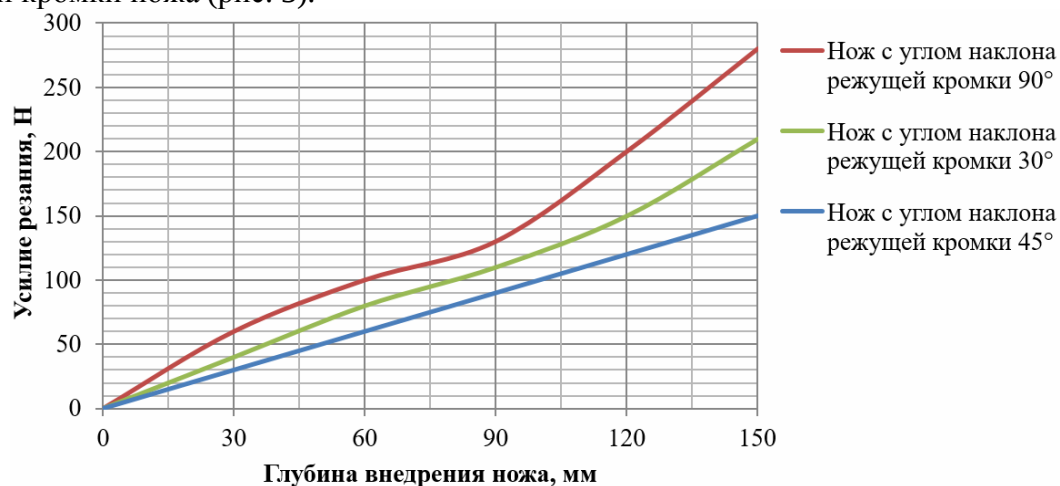


Рис. 3. Изменение усилия внедрения от угла наклона режущей кромки ножа

При одинаковой глубине внедрения ножей в массив торфяного сырья частично нарушенной структуры наибольшее сопротивление внедрению оказывается на прямой нож, а наименьшее на нож с углом скоса 45°.

За счет увеличения угла наклона режущей кромки ножа усилие резания снижается до 40%.



Рис. 2. Лабораторная установка для измерения усилия резания грунта

Удельная энергоёмкость β (Дж/мм³) процесса фрезерования полым коническим барабаном с проходными ножами определяется выражением:

$$\beta = \frac{N}{VSt}, \quad (1)$$

где V – скорость резания, мм/мин; S – скорость подачи сырья, мм/мин.; t – глубина резания, мм; N – мощность резания (кВт), определяемая выражением

$$N = FV, \quad (2)$$

где F – усилие резания, Н.

Из выражений (1) и (2) следует, что при снижении усилия резания снижается мощность резания и, следовательно, удельная энергоёмкость процесса фрезерования [8].

Конструкция конического фрезерного барабана, состоящего из сегментов, обеспечивает производственную технологичность изготовления проходных ножей. Расположение ножей на плоскости сегментов позволяет использовать прямые ножи без необходимости придания им формы части эллипса как в случае использования конической обечайки вместо сварных сегментов.

Угол расположения ножа α на поверхности сегмента фрезерного барабана относительно оси барабана обеспечивается за счет поворота ножа по плоскости с использованием всей поверхности сегмента (рис. 4).

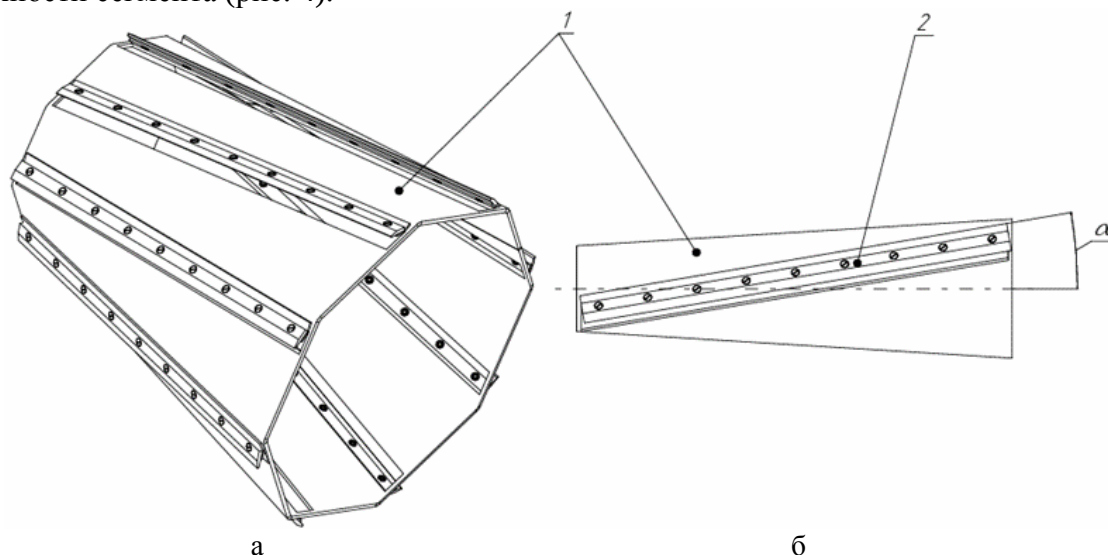


Рис. 4. Угол расположения ножа α на поверхности сегмента 1 фрезерного барабана: а) полый конический фрезерный барабан; б) сегмент 1 фрезерного барабана с проходным ножом 2

Эксплуатационная технологичность конструкции проявляется в возможности замены поврежденных ножей, закрепленных на сегментах фрезерного барабана болтовыми соединениями.

Сегменты конического полого фрезерного барабана вносят конструктивные ограничения, не позволяющие закрепить ножи под углом более 30° к оси барабана при сохранении общей геометрии рабочего органа, обеспечивающей на выходе материал с рациональными для сушки и транспортировки размерами. Однако, угол α равный 30° приводит к снижению усилия резания на 23% относительно параллельного расположения ножа относительно оси фрезы [4].

Обоснование рациональных параметров мобильного модуля измельчения, в частности, фрезерного рабочего органа позволяет снизить энергоёмкость процесса резания торфяного экскавированного сырья непосредственно в механизированном карьере. Геометрические характеристики фрезы влияют на степень механической переработки торфяного полуфабриката, позволяя в свою очередь при помощи регулировки этих характеристик обеспечивать требуемую степень механической переработки в зависимости от дальнейшего использования продукта [9].

Упруго-вязко-пластичные свойства массива торфяного экскавированного сырья частично нарушенной структуры повышают преимущества перепиливающего действия лезвия при косом резании относительно твердых материалов, обеспечивающиеся углом α расположения ножа при свободном непрерывном вращении фрезы относительно массива торфяного сырья [10].

Выводы

Результаты эксперимента, по определению влияния рационального расположения проходного ножа на сегменте фрезерного барабана под углом к оси барабана полностью согласуются с элементами теории резания лезвием связных грунтов. С увеличением угла α расположения ножа усилие врезания снижается от 23% при α равном 30° до 40% при α равном 45° в сравнении с прямым ножом.

Косое резание является рациональным способом измельчения упруго-вязко-пластичных материалов, таких как торфяное сырьё. Основное преимущества этого способа – снижение усилия резания за счет перепиливающего действия лезвия.

Определение рационального расположения проходного ножа на сегменте фрезерного барабана под углом к оси барабана позволяет в дальнейших исследованиях обосновать основные углы режущей кромки ножа и выбрать рациональные режимы резания принимая во внимание частично нарушенную структуру массива экскавированного торфяного сырья способную вызывать неоднородность нагрузки на режущую кромку с увеличением колебания сил резания. Также для рационализации конструкции фрезерного рабочего органа необходимо учитывать высокую адгезионную способность торфяного сырья.

Список литературы

1. Drebenstedt C. The responsible mining concept – contributions on the interface between science and practical needs // *Mine Planning and Equipment Selection*. 2014, pp. 3-24. doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_1.
2. Зюзин Б.Ф., Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Системный подход к развитию классификации торфяных машин и оборудования // *Горные науки и технологии*. – 2022. – Т. 7, №4. – С. 320-329. – doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-06.
3. 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.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100.
4. Патент № 232986 РФ. Фрезерный барабан для измельчения сырья / А.В. Михайлов, Ю.А. Казаков, Г.С. Козачков. – Заявка №2025100813 от 17.01.2025; опубл. 31.03.2025, Бюл. №10.
5. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.
6. 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.org/10.26730/1816-4528-2020-1-30-36.
7. Zwick Roell Z100 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.oeaw.ac.at/esi/facilities/macroscale-testing-devices/zwick-roell-z100>.
8. 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, vol. 217, no. 10, pp. 108646. doi.org/10.1016/J.COMPAG.2024.108646.
9. Опейко Ф.А. Торфяные машины. – Минск: Вышэйшая школа, 1968. – 408 с.
10. Гусева А.М., Яблонев А.Л. Оценка рациональных режимов производства кускового торфа фрезформочной машиной по показателям плотности и прочности // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – №3. – С. 87-95. – doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-87-95.

References

1. Drebenstedt C. The responsible mining concept – contributions on the interface between science and practical needs // *Mine Planning and Equipment Selection*. 2014, pp. 3-24. doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_1.
2. 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, vol. 7, no. 4, pp. 320-329. doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-06.
3. 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, no. 5, pp. 94-100. doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100.

4. Patent No. 232986 RU. Milling Drum for Raw Material Grinding / A.V. Mikhailov, Yu.A. Kazakov, G.S. Kozachkov. – Appl. No. 2025100813 from 17.01.2025; publ. 31.03.2025, Bull. No. 10.
5. Reznik N.E. Theory of Blade Cutting and Fundamentals of Cutting Apparatus Design – M.: Mechanical Engennring, 1975. – 311 p.
6. 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. doi.org/10.26730/1816-4528-2020-1-30-36.
7. Zwick Roell Z100 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.oeaw.ac.at/esi/facilities/macroscale-testing-devices/zwick-roell-z100>.
8. 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, vol. 217, no. 10, pp. 108646. doi.org/10.1016/J.COMPAG.2024.108646.
9. Opeyko F. A. Peat Machinery. – Minsk: Higher School, 1968. – 408 p.
10. Guseva A.M., Yablonev A.L. Assessment of rational operating modes in lump peat production with a single milling-and-molding machine by the density and strength data // Mining information and analytical bulletin. 2020, no. 3, pp. 87-95. doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-87-95.

<i>Сведения об авторах:</i>	<i>Information about authors:</i>
Козачков Григорий Сергеевич – аспирант	Kozachkov Grigorii Sergeevich – postgraduate student
Казаков Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, ассистент кафедры машиностроения	Kazakov Yuri Alekseevich – candidate of technical sciences, assistant of mechanical engineering Department
Михайлов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения	Mikhailov Aleksandr Viktorovich – doctor of technical sciences, professor of mechanical engineering Department
Смирнов Андрей Игоревич – аспирант	Smirnov Andrey Igorevich – postgraduate student
gkozachkov16@mail.ru	

Получена 11.06.2025