

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯ ФОРМОВАНИЯ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ И ЭНЕРГОМАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ ПО ДОБЫЧЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ ТОРФА

Д.Д. Лях¹, И.Н. Худякова¹, С.Л. Иванов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: severdar@mail.ru

Аннотация: Представлен алгоритм оценки агрегатированного торфодобывающего комплекса горного оборудования (АТДК ГО) и выбора технических параметров его функциональных элементов для добычи и переработки торфяного сырья в заранее установленных условиях его работы. Обоснованы причины разработки и внедрения подобных комплексов для реализации актуальных климатосберегающих технологий. Представлены экспериментальные данные по формированию торфяного сырья. Проанализированы группы оборудования для формирования комплекса и выявлены их функциональные зависимости от производительности в виде энергомассовых характеристик. Зависимости для добычного оборудования отражены на единой номограмме. Функциональные зависимости представлены в виде формул по каждой группе. Представленный алгоритм для оценки торфодобывающего комплекса реализован в прикладной компьютерной программе, дано описание ее работы в системе «добыча-переработка» при его функционировании на неосушенном месторождении с соответствующими видами потерь сырья и влаги. Графически отражены результаты оценки с помощью представленной программы. Проведен анализ и выявлены тенденции снижения величины энергомассовых параметров на 1 тону произведенной торфяной продукции в зависимости от количества функциональных элементов комплекса и перечня выполняемых операций на примере работы комплекса с условным объемом добычи в 50 000 т.

Ключевые слова: агрегатированный торфодобывающий комплекс горного оборудования, торфяное сырье, структурные решения комплекса, базовый и функциональные элементы комплекса, математическая модель комплекса, формирование, алгоритм оценки, неосушенное торфяное месторождение, добыча, энергомассовые параметры.

Для цитирования: Лях Д. Д., Худякова И. Н., Иванов С. Л. Обоснование параметров модуля формирования торфяного сырья и энергомассовых характеристик комплекса оборудования по добыче и переработке торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 93–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_93.

Justification of peat block-making module parameters and mass/power characteristics for peat production machinery

D.D. Lyakh¹, I.N. Khudyakova¹, S.L. Ivanov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: severdar@mail.ru

Abstract: The article describes the algorithm of estimation of a modular peat production equipment system (MPPE) and selection of engineering data for its functional modules designed for peat milling and treatment in the preset operating conditions. The whys and wherefores of development and introduction of such equipment systems to implement climate-saving technologies of the present day are exposed. The experimental data on peat block-making are presented. The groups of the peat block-making modules are examined, and their capacities in the form of mass/power relationships are revealed. All functional relations are compiled in a joint nomogram. The functional relations are presented by formulas per each equipment group. The peat production equipment estimation algorithm is implemented as an application program described in terms of the peat milling–block-making equipment system in operation on a wet peatland at the relevant peat loss and dehydration. The estimates obtained using the program are presented in a graphical form. The accomplished analysis reveals the trends of decreasing mass/power characteristics per 1 t of peat product as function of the number of the equipment modules and actual operations in terms of a peat milling and block-making equipment system having conventional capacity of 50 000 t.

Key words: modular peat production equipment system, peat, equipment system structure, basic and operation modules of equipment system, mathematical model, block-making, estimation algorithm, wet peatland, peat milling, mass/power characteristics.

For citation: Lyakh D. D., Khudyakova I. N., Ivanov S. L. Justification of peat block-making module parameters and mass/power characteristics for peat production machinery. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6):93-108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_93.

Введение

Реализация «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» предполагает ввод новых генерирующих мощностей, функционирующих на нетрадиционных возобновляемых источниках энергии, к которым относится торф [1, 2]. При этом для снижения антропогенного воздействия на окружающую среду в процессе добычи торфа требуется применение наилучших доступных технологий. В этой связи разработка торфяных месторождений без их предварительного водопонижения территорий является трендом торфодобычи [3–6].

Для реализации таких технологий необходимо переходить на инновационное оборудование и, в частности, формировать АТДК ГО для добычи и переработки торфяного сырья на плавучих базах (платформах), обеспечивающих поддер-

жание комплекса машин на плавку и исключаящих при этом осушение торфяного месторождения [7, 8]. Решений задачи по созданию и комплектации подобных комплексов существует достаточно много. Рациональный подбор оборудования для добычи торфяного сырья, которое будет входить в состав АТДК ГО и предварительная оценка энергопотребления его модулей (функциональных элементов) позволит обеспечить цикл выемки и последующей переработки от добытого сырья до товарного продукта с минимальными энергетическими затратами и потерями сырья по массе и объему, а также создать условия автономности работы комплекса за счет производства топливного торфа [9, 10].

Интерес к разработке залежей торфяного сырья основывается большей частью на получении недорогого вида топлива в местах его добычи в качестве

альтернативы затратному дальнепривозному углю, а также на поддержании агропромышленного сектора, производстве удобрений на торфяной основе для повышения плодородия почв. Все это способствует повышению энергетической и продовольственной безопасности в рамках программ импортозамещения в условиях санкционного давления на нашу страну, к тому же сокращает риск возникновения пожаров на отработанных площадях торфяных месторождений, особенно если было предварительное водопонижение территорий [11 – 14].

Методы

В рамках реализации климатосберегающих технологий и рационального пользования природными ресурсами, в частности, выбранной под разработку территорий, для формирования структуры и параметров АТДК ГО был разработан представленный на рис. 1 алгоритм. В алгоритме заложены принципы энергоэффективности и энергосбережения рассматриваемого оборудования, что позволяет минимизировать как величину установленной мощности каждого элемента АТДК ГО, так и минимизировать вес оборудования в целом при заданной проектной производительности с учетом естественных потерь при прохождении материальных потоков по технологической цепи комплекса. При этом следует отметить, что работ по водопонижению и специальной подготовке поверхности месторождения не требуется [15 – 18].

АТДК ГО включает в себя базовый и агрегатированные с ним функциональные элементы. В качестве базового элемента выступает конструкция, на которой монтируют функциональные элементы комплекса. Базовый элемент может быть модульным или блочным, и помимо выполнения базовой функции обеспечивает позиционирование функциональных элементов и модулей относительно за-

боя на торфяной залежи [19 – 21]. В качестве функциональных элементов представлены единицы оборудования, иногда объединенные в модули, выполняющие определенные операции в системе (цикле) «добыча–переработка», например, экскаватор, сепаратор, пресс и т.д.

Эффективность работы АТДК ГО требует максимально возможной стабильности прохождения потока добытого сырья, что возможно только при безотказной работе элементов и блоков его составляющих, учете величин номинальных потерь торфяного сырья по всей цепочке оборудования и с учетом всех вспомогательных операций при выполнении основных работ.

Согласно представленному алгоритму, первоначально проводят оценку потребных объемов выемки торфа в соответствии с заданной годовой программой в пересчете на абсолютно сухое торфяное сырье с последующим обратным пересчетом. Для каждой производственной операции ведется учет технологических потерь, также по абсолютно сухому веществу. При работе с алгоритмом выбирают и используют характеристики массы, мощности и производительности элементов, образующих комплекс, с учетом необходимого дублирования, поэлементную массу и установленную мощность, кроме того, их суммарные величины для АТДК ГО в целом, потребный объем торфяного сырья и последующий выход готовой продукции. Эти данные служат основой для задания параметров комплекса при составлении технического задания на ОКР и предпроектных работ.

Вместе с тем был проведен эксперимент по снижению влагосодержания при формировании торфяного сырья. Самым распространенным способом формирования торфа является прессование. Прессование торфа производится без связующих добавок, при этом происходит

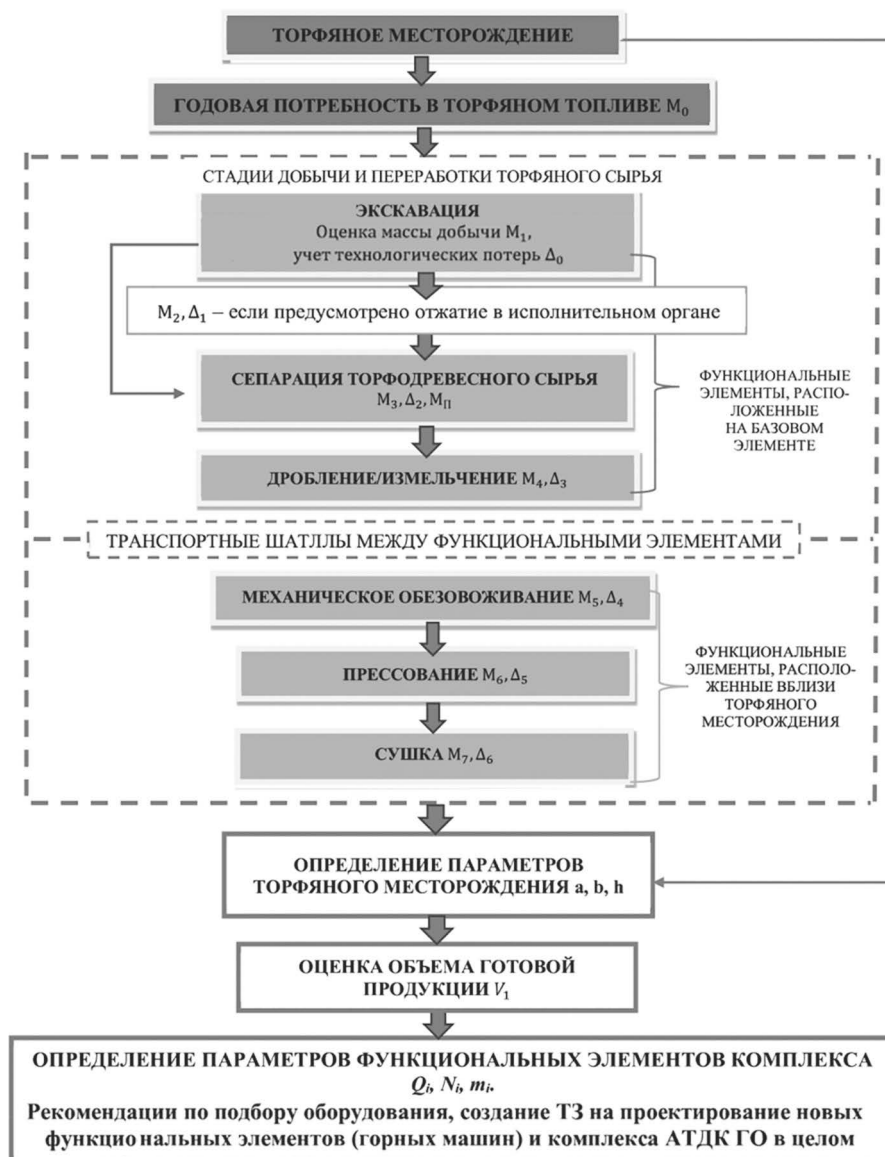


Рис. 1. Алгоритм оценки агрегатированного торфодобывающего комплекса

Fig. 1. Estimation algorithm of modular peat production equipment system

его уплотнение за счет сил молекулярного взаимодействия между частицами. Эти внутренние силы обеспечивают механическую прочность брикетов. Прессование торфа является энергоемким процессом: часть затраченной энергии при снятии внешнего давления расходуется на упругое расширение брикета,

основная же часть идет на образование внутренних связей и создание структуры спрессованного изделия. В результате уплотнения исчезают пустоты между частицами торфа, затем уплотняются и деформируются сами частицы, между которыми начинают действовать силы молекулярного сцепления.

Спрессованный торф, в отличие от исходного, имеет в 3–4 раза меньшее влагосодержание, в 3–5 раз большую плотность, теплота сгорания достигает 20 МДж/кг и превосходит этот параметр исходного фрезерного торфа.

Степень разложения торфа, применяемого для производства торфоблоков, не должна превышать 15%, а влага торфяного сырья составляет 93–98%. Толщина торфоблоков с учетом упругого расширения после формования и усадки в процессе сушки должна составлять примерно 50 мм, пористость – не менее 85%. При сушке вследствие объемной усадки пористость снижается на 3–7%. Исходя из этого, выражение для расчета пористости может быть представлено в виде:

$$n_{ТБ} = \left[1 - \frac{\gamma_{ТБ}}{\rho(1+W_{ТБ})} \right] 100\% , \quad (1)$$

где $W_{ТБ}$ – влагосодержание сформованного торфоблока; ρ – плотность твердой фазы торфа; $\gamma_{ТБ}$ – плотность сформованного торфоблока.

В этом выражении

$$\frac{\gamma_{ТБ}}{1+W_{ТБ}} = \gamma_c . \quad (2)$$

В расчетах процесса формования торфоблоков удобнее пользоваться плотностью сухого торфа в торфоблоке, чем плотностью торфоблока, которая зависит от его влагосодержания. Решая уравнение относительно плотности сухого торфа в торфоблоке γ_c , получим:

$$\gamma_c = \frac{100 - n_{ТБ}}{100} \rho . \quad (3)$$

Плотность торфоблока после формования по сухому торфу не должна превышать 125 кг/м³. В этом случае торфоблоки после сушки будут иметь достаточную пористость.

На рис. 2 представлены изменения давления формования от плотности торфоблока.

Увеличение степени разложения торфа ведет к уменьшению толщины торфоблоков после формования за счет снижения упругих деформаций, при этом возрастает влагосодержание торфоблоков, что связано с ухудшением фильтрационных свойств торфяного сырья.

Продолжительность формования торфяного сырья включает в себя время, необходимое для деформации и уплотнения, время выдержки. На рис. 3 показана зависимость влагосодержание торфоблока от продолжительности выдержки под давлением.

При этом результаты опытов показывают, что электрическое сопротивление образцов торфа по постоянному току ($R_{пост}$) на 15–40% выше такового для пест-

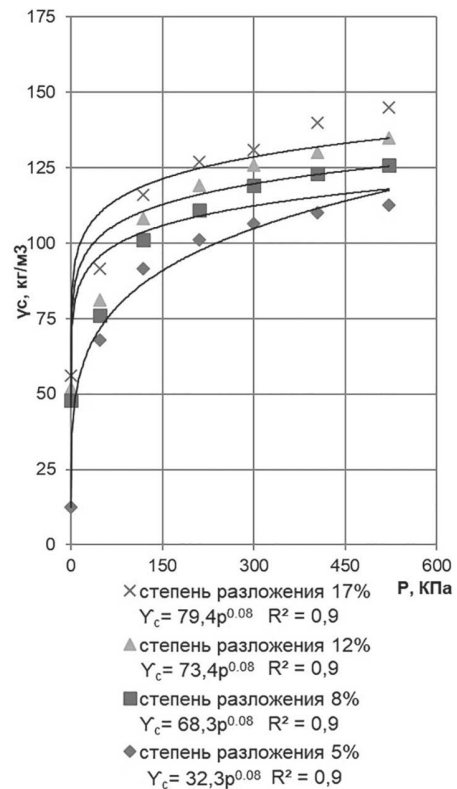


Рис. 2. Изменения давления формования от плотности торфоблока

Fig. 2. Block-making pressure versus density of peat block

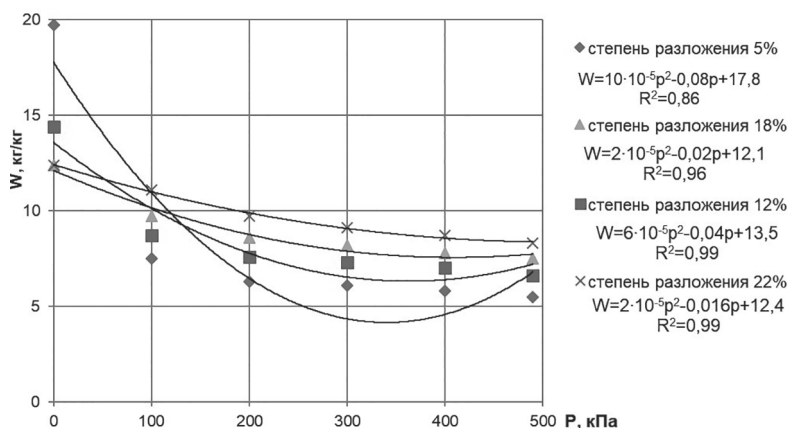


Рис. 3. Изменения влагосодержания от продолжительности выдержки под давлением

Fig. 3. Moisture content versus pressing duration

ременного тока низкой частоты в зависимости от влагосодержания материала.

Таким образом получены основные закономерности, описывающие процесс формирования торфяного сырья.

Возвращаясь к алгоритму (рис. 1), следует отметить, что формирование АТДК ГО горными машинами существующих типоразмерных рядов не позволяет оптимизировать структуру комплекса по критериям, производительности, установленной мощности и массе оборудования, поэтому, принимая во внимание принципы функционирования и достоинства отдельных горных машин, следует осуществлять поиск конструктивных решений и общей компоновки отдельных элементов и модулей комплекса, исходя из посылки взаимного влияния этих элементов друг на друга и на систему комплекса в целом, не рассматривая их как отдельные самостоятельные технологические машины. При этом научно-обоснованное техническое решение создания подобного комплекса горного оборудования с едиными энергомассовыми параметрами и, как следствие, техническими параметрами функциональных элементов комплекса как единой системы в рамках параметрического синтеза является далеко не стан-

дартной задачей. Для решения этой задачи был запланирован и проведен численный эксперимент с использованием массива данных технических характеристик горных машин [20 – 22]. Задачей последнего было выявление функциональных зависимостей изменения энерго-массовых характеристик соответствующих горных машин от производительности. В дальнейшем выявленные зависимости использовались для оценки величин аналогичных параметров соответствующих элементов и модулей комплекса. Перечень функциональных элементов комплекса и обозначения искомым параметров представлены в табл. 1.

Первым шагом для определения необходимых функциональных зависимостей был проведен анализ технических данных современных видов оборудования, входящего в состав комплекса. На примере выемочно-погрузочного органа и первого функционального элемента комплекса были рассмотрены характеристики гидравлических экскаваторов ряда зарубежных и отечественных производителей: Caterpillar, Hitachi Machinery, Volvo, Komatsu, «Тверской экскаватор» [23 – 26].

На основании выбранных по конкретным видам машин и оборудования

Таблица 1

Функциональные элементы АТДК ГО**Modular peat production equipment system and its operation modules**

Элемент АТДК ГО	Технические характеристики элементов
Экскаватор	Объем ковша V_k , м ³ ; производительность $\Pi_э$, м ³ /ч; мощность $P_э$, кВт; масса $g_э$, т
Сепаратор	Производительность $\Pi_с$, м ³ /ч; мощность $P_с$, кВт; масса $g_с$, т
Дробилка/измельчитель	Производительность $\Pi_{изм}$, м ³ /ч; мощность $P_{изм}$, кВт; масса $g_{изм}$, т
Обезвоживающая центрифуга	Производительность $\Pi_{об}$, м ³ /ч; мощность $P_{об}$, кВт; масса $g_{об}$, т
Пресс	Производительность $\Pi_{пр}$, м ³ /ч; мощность $P_{пр}$, кВт; масса $g_{пр}$, т
Барabanная сушильная установка	Производительность $\Pi_{суш}$, м ³ /ч; мощность $P_{суш}$, кВт; масса $g_{суш}$, т
Питатель ленточный	Производительность $\Pi_{п}$, м ³ /ч; мощность $P_{п}$, кВт; масса ленты $g_{п}$, т

данных была выполнена математическая обработка с последующей аппроксимацией искомых зависимостей мощности и массы экскаватора от его производительности соответственно:

$$P_э = f(\Pi_э), g_э = f(\Pi_э).$$

Полученные таким образом функциональные зависимости и соответствующие им коэффициенты детерминации R^2 отражены в выражениях (4) – (5):

$$P_э(\Pi_э) = 37,9e^{0,02\Pi_э}, R^2 = 0,78; \quad (4)$$

$$g_э(\Pi_э) = 7,7e^{0,02\Pi_э}, R^2 = 0,75. \quad (5)$$

Аналогично были определены зависимости (6) – (17) для всех функциональных элементов, потенциально входящих в состав комплекса и представленных соответствующими видами горных машин и оборудования [27, 28] (табл. 2):

Таблица 2

Сепаратор	Пресс
$P_с(\Pi_с) = 0,57e^{0,07\Pi_с}, R^2 = 0,82 \quad (6)$	$P_{пр}(\Pi_{пр}) = 2,01\Pi_{пр}^{0,6}, R^2 = 0,78 \quad (12)$
$g_с(\Pi_с) = 0,46e^{0,05\Pi_с}, R^2 = 0,83 \quad (7)$	$g_{пр}(\Pi_{пр}) = 0,4\Pi_{пр}^{0,75}, R^2 = 0,76 \quad (13)$
Дробильная установка	Барabanная сушилка
$P_{изм}(\Pi_{изм}) = 5,2\Pi_{изм}^{0,4}, R^2 = 0,88 \quad (8)$	$P_{суш}(\Pi_{суш}) = 2,65e^{0,17\Pi_{суш}}, R^2 = 0,87 \quad (14)$
$g_{изм}(\Pi_{изм}) = 0,52\Pi_{изм}^{0,53}, R^2 = 0,79 \quad (9)$	$g_{суш}(\Pi_{суш}) = 3,6\Pi_{суш}^{0,6}, R^2 = 0,97 \quad (15)$
Центрифуга для обезвоживания	Ленточный питатель
$P_{об}(\Pi_{об}) = 5,6\Pi_{об}^{0,5}, R^2 = 0,81 \quad (10)$	$P_{п}(\Pi_{п}) = 1,2e^{0,03\Pi_{п}}, R^2 = 0,93 \quad (16)$
$g_{об}(\Pi_{об}) = 0,46\Pi_{об}^{0,54}, R^2 = 0,77 \quad (11)$	$g_{п}(\Pi_{п}) = 0,17\Pi_{п}^{0,7}, R^2 = 0,88 \quad (17)$

Высокие значения коэффициентов детерминации R^2 (выражения (3) – (17)) свидетельствуют о том, что выявленные регрессионные зависимости с достаточной степенью достоверности отражают фактически имеющиеся тенденции для инженерных расчетов [29, 30].

Следующим шагом было объединение полученных зависимостей массы и мощности в функции производительности, для чего по каждому функциональному элементу были сконструированы номограммы (рис. 4).

Таким образом, был получен инструментарий для обоснованного выбора основных параметров этого оборудования при минимальных затратах времени в функции производительности элементов системы, составляющих АТДК ГО.

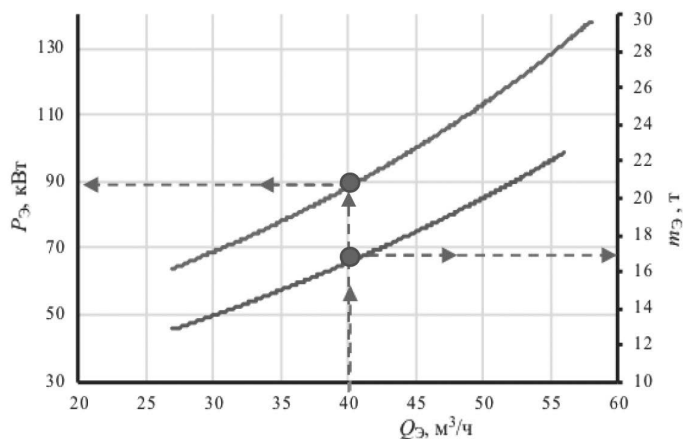


Рис. 4. Номограмма соответствия мощности и массы модуля экскавации АТДК ГО в функции производительности

Fig. 4. Nomogram of mass, power and capacity of excavation module within MPPES

Пунктирными стрелками (см. рис. 4) показан принцип выбора энергомассовых характеристик элементов горного оборудования комплекса в функции текущей производительности.

На основе алгоритма, представленного на рис. 1, и соответствующих функциональных зависимостей (3) – (17) была разработана математическая модель изменения основных энергомассовых па-

раметров агрегатированного комплекса для добычи торфяного сырья в системе «добыча–переработка». Дополнение математической модели результатами теоретических и экспериментальных исследований послужили основой для создания компьютерной программы, которая позволяет оценивать рациональность выбора величин значений параметров элементов, составляющих АТДК ГО, при

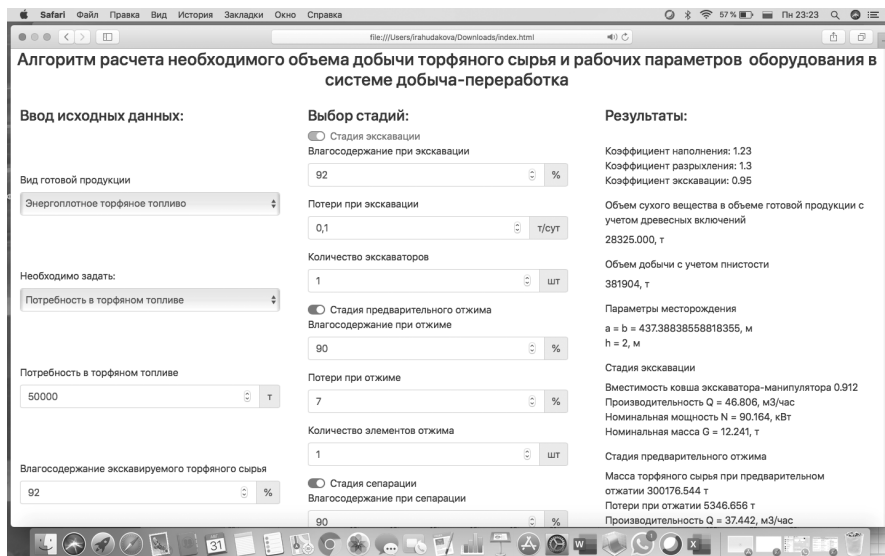


Рис. 5. Рабочий экран программы ввода-вывода данных по представленному алгоритму

Fig. 5. Input-output screen of the proposed algorithm-based program

формировании технического задания. Математическая модель была реализована в компьютерной программе на языке JavaScript «Оценка необходимого объема добычи торфяного сырья и рабочих параметров оборудования в системе «добыча-переработка» (Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616466). Ее рабочий экран (интерфейс) и тестовый расчет представлены на рис. 5.

Обсуждение

Для примера оценки работы программы был задан объем производства в 50 тыс. т в год. Комплекс оборудования включает в себя следующие группы машин и оборудования: экскаватор, сепаратор, обезвоживающая центрифуга, дробилка/измельчитель, пресс и барабанная сушильная установка [31, 32]. Расчетные данные по мощности и массе оборудования, входящего в состав комплекса, при годовом объеме добычи в 50 тыс. т получились следующими: экскаватор — $P_{\text{Э}} = 90,0$ кВт, $g_{\text{Э}} = 12,0$ т; сепаратор — $P_{\text{С}} = 7,0$ кВт, $g_{\text{С}} = 2,60$ т; дробилка — $P_{\text{ИЗМ}} = 6,0$ кВт, $g_{\text{ИЗМ}} = 1,5$ т,

обезвоживающая центрифуга — $P_{\text{Об}} = 6,0$ кВт, $g_{\text{Об}} = 3,0$ т, пресс — $P_{\text{Пр}} = 6,0$ кВт, $g_{\text{Пр}} = 5,0$ т, барабанная сушильная установка — $P_{\text{Суш}} = 73,0$ кВт, $g_{\text{Суш}} = 15,0$ т. Суммарная мощность и масса комплекса равны $P = 188,0$ кВт и $g = 39,0$ т соответственно.

Таким же образом была дана оценка комплексов с годовым объемом добычи в 100, 150, 200, 250 и 300 тыс. т в год. Результаты представлены на рис. 6 и рис. 7 и отражают суммарные значения по потребляемой мощности комплекса и по массе его функциональных элементов. Ранее было установлено, что целесообразно разделить комплекс на две части: комплекс добычи и первичной переработки оставить на плавучей платформе, а последующую переработку и сушку расположить на борту карьера, обеспечив движение потоков транспортными шаттлами в челночном режиме.

Анализ данных, представленных на рис. 7, показывает, что с увеличением объемов добычи прослеживается устойчивая тенденция снижения величины энергомассовых параметров, отнесенных к 1 т готовой продукции, при этом

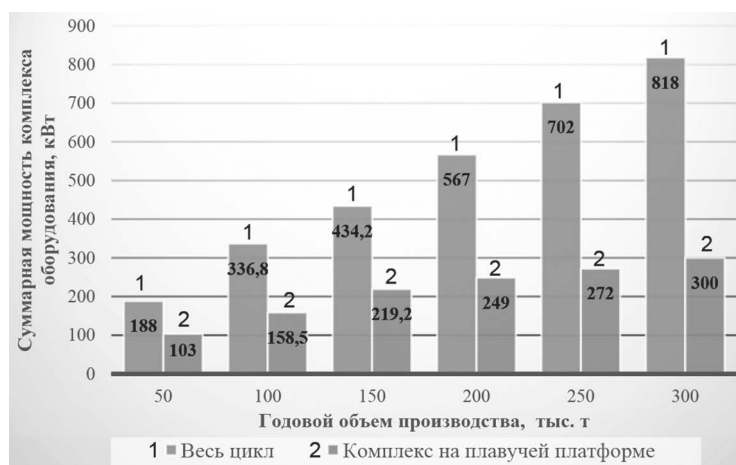


Рис. 6. Суммарные показатели мощности комплекса оборудования при полном цикле «добыча-переработка» и при цикле «добыча-первичная переработка», расположенном на плавучей платформе

Fig. 6. Overall capacity of equipment system in complete milling–processing cycle and in milling–pretreatment cycle on floating platform



Рис. 7. Суммарные показатели массы комплекса оборудования при полном цикле «добыча-переработка» и при цикле «добыча-первичная переработка», расположенном на плавучей платформе

Fig. 7. Overall mass of equipment system in complete milling–processing cycle and in milling–pretreatment cycle on floating platform

для плавучей платформы с циклом «добыча–первичная переработка» такое снижение более выражено, чем для комплекса с полным циклом. Так, часовая затрата энергии для комплекса с полным циклом «добыча–переработка» на 50 тыс. т составляет 103,9 МДж, а для комплекса с годовой производительностью в 300 тыс. т уже 75,4 МДж.

Аналогичные значения для комплекса «добыча–первичная переработка» на плавучей платформе с годовой производительностью в 50 и 300 тыс. т — 56,9 и 27,6 МДж соответственно.

Что касается массы оборудования, то имеет место похожая тенденция, так, для плавучей платформы с годовой производительностью 50 и 300 тыс. т — 0,35 и 0,24 т соответственно. Информация о массе оборудования чрезвычайно важна для оценки водоизмещения платформы [33–36], что является одним из основных параметров комплекса.

Заключение

Представленный алгоритм, основанный на принципах энергоэффективности и энергосбережения, позволяет подбирать и комплектовать АТДК ГО эле-

ментами, модулями и составляющими его блоками с заданными, взаимосвязанными параметрами, обеспечивающими возможно достижимую энергоэффективность всего горного комплекса при применении его на неосушенных месторождениях.

На основании проведенных исследований выявлены функциональные зависимости изменения энергомассовых параметров всего спектра функциональных элементов, составляющих АТДК ГО для работы на неосушенных месторождениях, от производительности соответствующего элемента.

Показана возможность формирования с одновременной оценкой эффективности структуры системы комплекса как в целом, так и поэлементно при выборе основных конструктивно-технологических параметров на ранних стадиях процесса их проектирования с применением разработанной компьютерной программы в диалоговом режиме.

Благодаря анализу полученных данных в программе от 50 до 300 тыс. т выявлены тенденции снижения величины энергомассовых параметров на 1 т произведенной торфяной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиев Ж. К., Галиева Н. В. Развитие топливно-энергетического комплекса в соответствии с Энергетической стратегией России // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 215–220. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-215-220.
2. Инишева Л. И., Порохина Е. В., Сергеева М. А., Кобак К. И. Торфяные болота и их биосферная роль // Биосфера. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 128–133.
3. Lempinen H. «Barely surviving on a pile of gold»: Arguing for the case of peat energy in 2010s Finland // Energy Policy. 2019, vol. 128, pp. 1–7.
4. Мисников О. С., Панов В. В. Туманное будущее торфяной отрасли России // Техника и технология горного дела. — 2018. — № 1. — С. 42–56.
5. Заровняев Б. Н., Попов В. Ф., Шубин Г. В., Будикина М. Е., Соколова М. Д. Перспективы освоения месторождений торфа Арктических и Субарктических районов России // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 168–177. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-168-177.
6. Болтушкин А. Н., Беляков В. А. Совершенствование технологии добычи фрезерного торфа низкой степени разложения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 2. — С. 13–19. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-13-19.
7. Regan S., Flynn R., Gill L., Naughton O., Johnston P. Impacts of groundwater drainage on peatland subsidence and its ecological implications on an Atlantic raised bog // Water Resources Research. 2019, vol. 7, no. 55, pp. 6153–6168. DOI: 10.1029/2019WR024937.
8. Фадеев Д. В., Звонарев И. Е. Патент РФ № 2655235, 24.05.2018. Плавающая платформа. 2018. Бюл. № 15.
9. Валиев Н. Г. О., Гревцев Н. В., Лебзин М. С. Гидромеханизированный способ добычи торфа: современное состояние и перспективы // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2020. — № 4. — С. 141–150.
10. Пермякова Е. К. Технические решения для разработки обводненных торфяных месторождений / Современные тенденции и инновации в науке и производстве. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. — Уфа: Научно-издательский центр «Вестник науки», 2019. — С. 61–66.
11. Горячёв В. И., Михеев И. И., Щербакова Д. М. Технологический круглогодичный комплекс гидромеханического фракционирования торфяного сырья // Труды Инсторфа. — 2019. — № 20(73). — С. 25–28.
12. Lishtvan I. I., Kurzo B. V., Gaidukevich O. M., Sorokin A. I. Prospects for local mineral and raw materials use for the development of the southwestern region of Gomel region // Nature Management. 2020, vol. 2, pp. 77–87.
13. Якупов Д. Р., Иванова П. В., Иванов С. Л. Физическое моделирование сопротивления перемещению грузов по поверхности торфяного месторождения на стенде // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-1. — С. 117–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_117.
14. Худякова И. Н., Вагапова Э. А., Иванов С. Л. Выбор и обоснование параметров технологического оборудования комплекса добычи торфяного сырья из натуральной залежи // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — СВ 4. — С. 3–15.
15. Зюзин Б. Ф., Жигульская А. И., Яконовская Т. Б., Оганесян А. С., Смирнов К. С. Машины и оборудование для разработки торфяных месторождений, как класс горных машин для открытых горных работ / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека». — Екатеринбург, УГГУ, 2020. — С. 36–39.
16. Михайлов А. В., Гармаев О. Ж., Федоров А. С., Гарифуллин Д. Р. Эффективность карьерной добычи торфа с полевым механическим обезвоживанием // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 7. — С. 30–41. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-30-41.

17. Заровняев Б. Н., Попов В. Ф., Шубин Г. В., Будикина М. Е., Соколова М. Д. Перспективы освоения месторождений торфа Арктических и Субарктических районов России // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 168–177. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-168-177.

18. Великанов В. С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 29–36.

19. Hu P., Zhu J., Gong J., Zhang D., Liu C., Zhao Y., Guo Y. Development of a comprehensive driving cycle for construction machinery used for energy recovery system evaluation: A case study of medium hydraulic excavators // Mathematical Problems in Engineering. 2021, vol. 2021. DOI: 10.1155/2021/8132878.

20. Юдин С. А. Основные теоретические и экспериментальные результаты обоснования инвариантов предельных напряженно-деформированных состояний при взаимодействии рабочих органов горных машин с торфяной залежью / Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов. Сборник научных трудов. — Тверь, ТГТУ, 2018. — С. 162–169.

21. Фомин К. В., Крылов К. С., Харламов В. Е., Морозихина И. К. Оценка плотности распределения воздействий со стороны поверхности карты на элементы ходовых конструкций торфяной машины // Труды Инсторфа. — 2019. — № 20(73). С. 32–36.

22. Казаков Ю. А. Анализ условий функционирования горнотранспортного агрегата для транспортировки экскаваторного торфяного сырья / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека». — Екатеринбург, УГГУ, 2019. — С. 57–60.

23. Chen Y., Wang A., Li X. Load classification design of excavator multiway valve // Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh / Journal of Xi'an Jiaotong University. 2020, vol. 54, no. 9, pp. 100–108. DOI: 10.7652/xjtuxb202009011.

24. Kuvshinkin S. Y., Ivanova P. V. Developing a methodology for estimation of excavation techniques for given operating conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, no. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012121.

25. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Yu. Evaluation of working hours of quarry excavators of a promising model range in real operating conditions // Journal of Mining Institute. 2020, vol. 242. pp. 29–36. DOI: DOI:10.31897/PMI.2020.2.228.

26. Бабокин Г. И. Оценка влияния технических параметров, условий и режима работы одноковшового экскаватора на эксплуатационную энергоэффективность // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 11. — С. 199–207. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-199-207.

27. Михайлов А. В., Родионов Е. А., Звонарев И. Е. Анализ условий вертикальной выемки торфяного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 1. — С. 48–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-48-54.

28. Jucha W., Mareczka P., Okupny D. Using remote sensing materials to assess the effects of peat extraction on the morphology and vegetation cover of a raised bog // Mires and Peat. 2020, vol. 26, pp. 19. DOI: 10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1835.

29. Yablonev A. L., Gorlov I. V., Kozyreva L., Fomin K. Optimization of driving trailers transmission for peat transportation // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 41. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103001.

30. Федоров А. С., Казаков Ю. А., Фадеев Д. В. Параметры мундштука шнекового пресса с учетом требований к торфяной формованной продукции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № S9. — С. 3–15.

31. Menegaki M., Michalakopoulos T., Roumpos C. Exploring the effect of physical, human and technical factors on bucket wheel excavators' efficiency: a fuzzy cognitive map approach //

International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2019, vol. 10, no. 2-4, pp. 189–204. DOI: 10.1504/IJMME.2019.104447.

32. Zhang L., Zhao J., Long P., Wang L., Qian L., Lu F., Song X., Manocha D. An autonomous excavator system for material loading tasks // *Science Robotics*. 2021, vol. 6, no. 55. DOI: 10.1126/scirobotics.abc3164.

33. Ivanova P., Ivanov S., Mikhailov A., Shishlyannikov D. Extraction mechanization of soft soils // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 610–617.

34. Яблонев А. Л., Гусева А. М. Обоснование параметров шнекового пресса для добычи кускового торфа // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.П. Кубачека». – Екатеринбург: УГГУ, 2019. – С. 172–175.

35. Khudyakova I. N., Vagapova E. A., Ivanov S. L. Raw peat production and processing from flooded fields and approaches to maintain dehydration // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, vol. 194, no. 3. DOI: 10.1088/1755-1315/194/3/032010.

36. Кремчеев Э. А. Особенности структуры комплекса технологических операций при экскаваторной добыче торфа со стадийным обезвоживанием сырья // *Записки Горного института*. – 2018. – Т. 231. – С. 225–234. **МИАБ**

REFERENCES

1. Galiev Zh. K., Galieva N. V. Development of the fuel and energy sector in compliance with the energy strategy in Russia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 6, pp. 215–220. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-215-220.

2. Inisheva L. I., Porokhina E. V., Sergeeva M. A., Kobak K. I. Peat bogs and their biospheric role. *Biosphere*. 2019, vol. 11, no. 3, pp.128–133. [In Russ].

3. Lempinen H. «Barely surviving on a pile of gold»: Arguing for the case of peat energy in 2010s Finland. *Energy Policy*. 2019, vol. 128, pp. 1–7.

4. Misnikov O. S., Panov V. V. The foggy future of the peat industry in Russia. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2018, no. 1, pp. 42–56. [In Russ].

5. Zarovnyaev B. N., Popov V. F., Shubin G. V., Budikina M. E., Sokolova M. D. Prospects of peat development in the Arctic and Subarctic zones of Russia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6, pp. 168–177. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-168-177.

6. Boltushkin A. N., Belyakov V. A. Improvement of cutting technology for subsurface peat of low decomposition rate. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 2, pp. 13–19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-13-19.

7. Regan S., Flynn R., Gill L., Naughton O., Johnston P. Impacts of groundwater drainage on peatland subsidence and its ecological implications on an Atlantic raised bog. *Water Resources Research*. 2019, vol. 7, no. 55, pp. 6153–6168. DOI: 10.1029/2019WR024937.

8. Fadeev D. V., Zvonarev I. E. *Patent RU 2655235*, 24.05.2018. [In Russ].

9. Valiev N. G. O., Grevtsev N. V., Lebzin M. S. Hydromechanized method of peat extraction: current state and prospects. *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2020, no. 4, pp. 141–150. [In Russ].

10. Permyakova E. K. Technical solutions for the development of flooded peat deposits. *Sovremennye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve. Sbornik statey po materialam mezh-dunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern trends and innovations in science and production. Collection of articles based on the materials of the international scientific-practical conference], Ufa, 2019, pp. 61–66. [In Russ].

11. Goryachev V. I., Mikheev I. I., Shcherbakova D. M. Technological year-round complex of hydromechanical fractionation of peat raw materials. *Proceedings of Instorf*. 2019, no. 20(73), pp. 25–28. [In Russ].

12. Lishtvan I. I., Kurzo B. V., Gaidukevich O. M., Sorokin A. I. Prospects for local mineral and raw materials use for the development of the southwestern region of Gomel region. *Nature Management*. 2020, vol. 2, pp. 77–87.

13. Yakupov D. R., Ivanova P. V., Ivanov S. L. Physical modeling of the resistance to the movement of goods on the surface of a peat deposit on the stand. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-1, pp. 117–129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_117.

14. Khudyakova, I. N., Vagapova E. A., Ivanov S. L. Selection and justification of the parameters of technological equipment for the extraction of peat raw materials from a natural deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, special edition 4, pp. 3–15. [In Russ].

15. Zyuzin B. F., Zhigul'skaya A. I., Yakonovskaya T. B., Oganessian A. S., Smirnov K. S. Machines and equipment for the development of peat deposits as a class of mining machines for open pit mining. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti. Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Chteniya pamyati V.R. Kubacheka»* [Technological equipment for the mining and oil and gas industries. Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference «Readings in Memory of V.R. Kubachek»], Ekaterinburg, UGGU, 2020, pp. 36–39. [In Russ].

16. Mikhailov A. V., Garmayev O. J., Fedorov A. S., Garifullin D. R. Efficiency of open cast peat mining with mechanical field dewatering. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 7, pp. 30–41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-30-41.

17. Zarovnyaev B. N., Popov V. F., Shubin G. V., Budikina M. E., Sokolova M. D. Prospects of peat development in the Arctic and Subarctic zones of Russia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6, pp. 168–177. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-168-177.

18. Velikanov V. S. Forecasting the loading of the working equipment of a quarry excavator according to a fuzzy-logistic model. *Journal of Mining Institute.* 2020, vol. 241, pp. 29–36. [In Russ].

19. Hu P., Zhu J., Gong J., Zhang D., Liu C., Zhao Y., Guo Y. Development of a comprehensive driving cycle for construction machinery used for energy recovery system evaluation: A case study of medium hydraulic excavators. *Mathematical Problems in Engineering.* 2021, vol. 2021. DOI: 10.1155/2021/8132878.

20. Yudin S. A. The main theoretical and experimental results of the substantiation of invariants of limit stress-strain states in the interaction of the working bodies of mining machines with peat deposit. *Teoreticheskie issledovaniya i eksperimental'nye razrabotki studentov i aspirantov. Sbornik nauchnykh trudov* [Theoretical research and experimental development of students and graduate students of Tver State Technical University. Collection of scientific papers], Tver, TGTU, 2018, pp. 162–169. [In Russ].

21. Fomin K. V., Krylov K. S., Kharlamov V. E., Morozikhina I. K. Estimation of the distribution density of impacts from the surface of the map on the elements of the running structures of a peat machine. *Proceedings of Instorf.* 2019, no. 20(73), pp. 32–36. [In Russ].

22. Kazakov Yu. A. Analysis of the operating conditions of the mining transport unit for the transportation of excavator peat raw materials. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti. Sbornik trudov XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Chteniya pamyati V.R. Kubacheka»* [Technological equipment for the mining and oil and gas industries. Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference «Readings in Memory of V.R. Kubachek»], Ekaterinburg, UGGU, 2019, pp. 57–60. [In Russ].

23. Chen Y., Wang A., Li X. Load classification design of excavator multiway valve. *Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh / Journal of Xi'an Jiaotong University.* 2020, vol. 54, no. 9, pp. 100–108. DOI: 10.7652/xjtuxb202009011.

24. Kuvshinkin S. Y., Ivanova P. V. Developing a methodology for estimation of excavation techniques for given operating conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019, vol. 378, no. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012121.

25. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Yu. Evaluation of working hours of quarry excavators of a promising model range in real operating conditions. *Journal of Mining Institute.* 2020, vol. 242, pp. 29–36. DOI: DOI:10.31897/PMI.2020.2.228.

26. Babokin G. I. Influence of technical parameters, work conditions and operating mode on energy efficiency of single-bucket exactor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 11, pp. 199–207. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-199-207.

27. Mikhaylov A. V., Rodionov E. A., Zvonarev I. E. Analysis of conditions for vertical cutting of peat. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 1, pp. 48–54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-48-54.

28. Jucha W., Mareczka P., Okupny D. Using remote sensing materials to assess the effects of peat extraction on the morphology and vegetation cover of a raised bog. *Mires and Peat.* 2020, vol. 26, pp. 19. DOI: 10.19189/МаP.2019.OMB.StA.1835.

29. Yablonev A. L., Gorlov I. V., Kozyreva L., Fomin K. Optimization of driving trailers transmission for peat transportation. *E3S Web of Conferences.* 2018, vol. 41. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103001.

30. Fedorov A. S., Kazakov Yu. A., Fadeev D. V. Parameters of the mouthpiece of a screw press taking into account the requirements for peat molded products. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. S9, pp. 3–15. [In Russ].

31. Menegaki M., Michalakopoulos T., Roumpos C. Exploring the effect of physical, human and technical factors on bucket wheel excavators' efficiency: a fuzzy cognitive map approach. *International Journal of Mining and Mineral Engineering.* 2019, vol. 10, no. 2-4, pp. 189–204. DOI: 10.1504/IJMME.2019.104447.

32. Zhang L., Zhao J., Long P., Wang L., Qian L., Lu F., Song X., Manocha D. An autonomous excavator system for material loading tasks. *Science Robotics.* 2021, vol. 6, no. 55. DOI: 10.1126/scirobotics.abc3164.

33. Ivanova P., Ivanov S., Mikhailov A., Shishlyannikov D. Extraction mechanization of soft soils. *Journal of Applied Engineering Science.* 2021, vol. 19, no. 3, pp. 610–617.

34. Yablonev A. L., Guseva A. M. Substantiation of the parameters of a screw press for the extraction of lump peat. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti. Sbornik trudov XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Chleniya pamyati V.R. Kubacheka»* [Technological equipment for the mining and oil and gas industries. Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference «Readings in Memory of V.R. Kubachek», Ekaterinburg, UGGU, 2019, pp. 172–175. [In Russ].

35. Khudyakova I. N., Vagapova E. A., Ivanov S. L. Raw peat production and processing from flooded fields and approaches to maintain dehydration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2018, vol. 194, no. 3. DOI: 10.1088/1755-1315/194/3/032010.

36. Kremcheev E. A. Features of the structure of the complex of technological operations in the excavation of peat with staged dehydration of raw materials. *Journal of Mining Institute.* 2018, vol. 231, pp. 225–234. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лях Дарья Дмитриевна¹ – аспирант,

e-mail: severdar@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9917-4785,

Худякова Ирина Николаевна¹ – канд. техн. наук,

e-mail: irikhudyakova@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0186-659X,

Иванов Сергей Леонидович¹ – д-р техн. наук,

профессор, e-mail: lisalisa74@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7014-2464,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Лях Д.Д., e-mail: severdar@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.D. Lyakh¹, Graduate Student, e-mail: severdar@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9917-4785,

*I.N. Khudyakova*¹, Cand. Sci. (Eng.),
e-mail: irikhudyakova@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0186-659X,
*S.L. Ivanov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: lialisa74@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7014-2464,
¹ Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: D.D. Lyakh, e-mail: severdar@mail.ru.

Получена редакцией 30.03.2022; получена после рецензии 15.04.2022; принята к печати 10.05.2022.
Received by the editors 30.03.2022; received after the review 15.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

**АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

(№ 1252/06-22 от 28.04.2022; 25 с.)

*Дмитриева Валерия Валерьевна*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
*Андреев Илья Андреевич*¹ — студент, e-mail: iluahaand@mail.ru,
¹ Российский университет Нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Обоснована необходимость моделирования основного элемента оборудования технологических процессов — двигателя. В качестве примера выбран асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором, как наиболее распространенный в современной горной и нефтедобывающей промышленности. Приведен принцип выбора двигателя для главного насоса нефтеперекачивающей станции. Рассмотрены два варианта схемы замещения двигателя. Приведены две методики расчета схемы замещения по паспортным данным. Выбрана наиболее адекватная методика, критерий выбора — мера близости модельных характеристик к реальным, полученным экспериментально. Приведены два способа моделирования АД — с использованием блоков специализированной библиотеки SimPowerSystem пакет прикладных программ Matlab, и при помощи структурной схемы, построенной по внутренней модели двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, схема замещения, паспортные данные двигателя, методика расчета схемы замещения, схема моделирования, способ моделирования, оценка адекватности методики расчета, механическая характеристика двигателя.

**ANALYSIS AND COMPARISON OF VARIOUS METHODS OF CALCULATION
AND MODELING OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR**

*V.V. Dmitrieva*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
*I.A. Andreev*¹, Student, e-mail: iluahaand@mail.ru,
¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), 119991, Moscow, Russia.

The article substantiates the necessity of modeling the main element of the equipment of technological processes — the engine. An asynchronous motor with a short-circuited rotor is chosen as an example, since it is the most common in the modern mining and oil industry. The principle of choosing an engine for the main pump of an oil pumping station is given. Two variants of the engine replacement scheme are considered. Two methods of calculating the replacement scheme based on passport data are given. The most adequate method was chosen, the authors took the measure of the proximity of the model characteristics to the real ones obtained experimentally as the criterion of choice. There are two ways of modeling an asynchronous motor — using blocks of the specialized library SimPowerSystem application software package Matlab, and using a block diagram built on the internal model of the engine.

Key words: asynchronous motor with a short-circuited rotor, replacement circuit, engine passport data, method of calculating the replacement circuit, simulation scheme, modeling method, assessment of the adequacy of the calculation method, mechanical characteristics of the engine.