

УДК 621.9:631.878

А. Э. Юницкий¹, доктор философии транспорта,
Н. С. Першай², кандидат технических наук,
С. А. Арнаут³, кандидат технических наук

^{1,2,3}Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», 220089 Минск, ул. Железнодорожная, 33,
Республика Беларусь, ²n.pershai@unitsky.com

¹Общество с ограниченной ответственностью «Астроинженерные технологии», 220089 Минск,
ул. Железнодорожная, 33, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОУДАРА НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ БУРОГО УГЛЯ КАК КОМПОНЕНТА ПОЧВОГРУНТА

В работе рассмотрено применение электрогидроудара для измельчения бурого угля в качестве компонента почвогрунта при выращивании растений. Представлены результаты влияния различных факторов на качество измельчения бурого угля в электрогидроударной установке. Подобраны оптимальные режимы работы электрогидроударной установки (рабочий зазор, загрузка, исходная фракция) в зависимости от исходного сырья для получения почвогрунтов с использованием измельчённого бурого угля в качестве органической составляющей для выращивания растений.

Ключевые слова: электрогидроударная установка; измельчение; бурый уголь; почвогрунт.

Рис. 7. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

A. E. Unitsky¹, DSc in Philosophy of Transport,
N. Pershai², PhD in Technical Sciences,
S. Arnaut³, PhD in Technical Sciences

^{1,2,3}Unitsky String Technologies, Inc., 33 Zheleznodorozhnaya Str., 220089 Minsk, the Republic of Belarus,
²n.pershai@unitsky.com

¹Astroengineering technologies, LLC, 33 Zheleznodorozhnaya Str., 220089 Minsk, the Republic of Belarus

INFLUENCE OF ELECTROHYDRAULIC IMPACT ON THE BROWN COAL GRINDING AS A SOIL COMPONENT

The use of an electrohydrostrike for brown coal grinding as a component of the soil when growing plants has been studied. The results of various factors on the quality of brown coals grinding using an electrohydraulic impact installation are presented. The optimal operating modes of the electro-hydraulic equipment (working gap, loading, initial fraction) have been selected depending on the raw materials for the soil using grinded brown coal as an organic raw material for growing plants.

Key words: electrohydraulic equipment; grinding; brown coal; soil.

Fig. 7. Table 1. Ref.: 10 titles.

Введение. Биогумус является основой плодородия почв и здоровья человека. Для обеспечения продовольственной безопасности человечества огромное значение имеет состояние земель, которые дают людям всё необходимое для пищи. Уже больше века происходит масштабное использование в сельском хозяйстве минеральных удобрений и ядохимикатов, что приводит к катастрофическому ухудшению биогеоценозов почв и продуктов питания, выращенных на этих почвах. Это влечет за собой нарушение круговорота живого вещества, формировавшегося в течение миллионов лет эволюции, деградацию плодородного слоя почвы и, соответственно, ухудшение здоровья человечества. В живой природе все процессы протекают по принципу круговорота веществ, так, например, все органические отходы перерабатываются в плодородный слой почвы (гумус) с помощью нескольких тысяч видов почвенных микроорганизмов.

Восстановить плодородие почв возможно только с помощью органического удобрения — биогумуса, который представляет собой органическое вещество, получаемое в процессе жизнедеятельности дождевых червей и продуцируемых ими ассоциаций тысяч видов агрономически ценных аэробных и анаэробных почвенных микроорганизмов. Гумус — основная органическая часть почвы, содержащая комплекс питательных веществ, необходимых растениям, в том числе нерастворимые соли гуминовых кислот. Гумус улучшает физические свойства почвы, является отличным хранилищем питательных элементов, создаёт прочную почвенную структуру, которая обеспечивает благоприятную циркуляцию воды и воздуха.

Бурые угли характеризуются повышенным содержанием фенольных, карбоксильных и гидроксильных групп, наличием свободных гуминовых кислот (до 64 %). Среднее содержание минерального остатка (зола) бурых углей составляет 20...45 % от массы сухого вещества. Основными компонентами золы углей являются диоксид кремния (около 30...60 %), оксид алюминия (порядка 10...20 %), а также оксиды кальция (7...15 %) и железа (8...15 %). Элементный состав золы сильно зависит не только от доминирующих пород исходных растений, но и от условий формирования угольного пласта (глубина залегания, подземные водоёмы, состав почвы на данной глубине и др.) [1].

Бурые угли также используются в качестве источника получения биогумуса — основы плодородия почв. Для получения биогумуса сотрудниками компании ЗАО «Струнные технологии» была разработана технология получения почвогрунтов и органических биоудобрений под торговыми марками «Биогумус uTeга» и «Эликсир плодородия uTeга» [2; 3], одним из компонентов которых является измельчённый бурый уголь как источник гуминовых кислот, макро- и микроэлементов. Внесение в грунт такого биогумуса от 2 % даже песок пустыни превращает в плодородную почву. В ряде работ [4—6] опубликованы результаты применения биогумуса uTeга при выращивании растений, показывающие его высокую эффективность, в том числе при использовании в замкнутых экосистемах, теплицах, оранжереях и т. п.

Основным технологическим параметром оценки качества измельчения бурого угля является гранулометрический состав, поэтому важно правильно подобрать оборудование для осуществления этого процесса. Для получения почвогрунтов подходит измельчённый бурый уголь крупностью 150 мкм и менее, при этом чем меньше размер частиц, тем быстрее органическое вещество будет преобразовано почвенными микроорганизмами в усвояемую для растений форму. Данная стадия технологического процесса является ещё и самой энергозатратной. Подбор оборудования для измельчения со сниженным энергопотреблением позволит понизить технологические затраты на производство почвогрунтов и удобрений, а также повысить их полезные свойства.

В качестве альтернативы традиционным способам измельчения угля обращают на себя внимание электрогидроударные установки (далее — ЭГУ). Использование ЭГУ в промышленности достаточно разнообразно [7]. Известно около 35 направлений применения их в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, энергетике: дробление материалов, обогащение руд, извлечение остаточных полезных ископаемых, разрушение различного рода объектов, смешивание растворов, очистка поверхностей и др.

Принцип работы таких установок основан на электрогидравлическом эффекте (эффект Юткина), сущность которого заключается в преобразовании электрической энергии в механическую с высоким КПД без применения механических звеньев. Происходит это за счёт того, что внутри объёма жидкости протекает специально сформированный импульсный электрический разряд, вокруг зоны его образования возникают сверхвысокие импульсные давления, способные совершать механическую работу и сопровождающиеся комплексом физико-химических явлений [7]. Один из главных плюсов использования электрогидроударной технологии — экологичность, пожаро- и взрывобезопасность.

Несмотря на известность и применение в различных отраслях электрогидравлического удара для измельчения природных материалов, в открытых источниках отсутствует информация о влиянии природы сырья, технологических параметров измельчения бурого угля на ЭГУ как в целом, так и в разрезе использования его в качестве компонента почвогрунта. Чаще всего в работах имеется разрозненная информация, касающаяся только каких-то отдельных аспектов эффекта Юткина либо общего плана, что не позволяло использовать её на практике в реальных условиях.

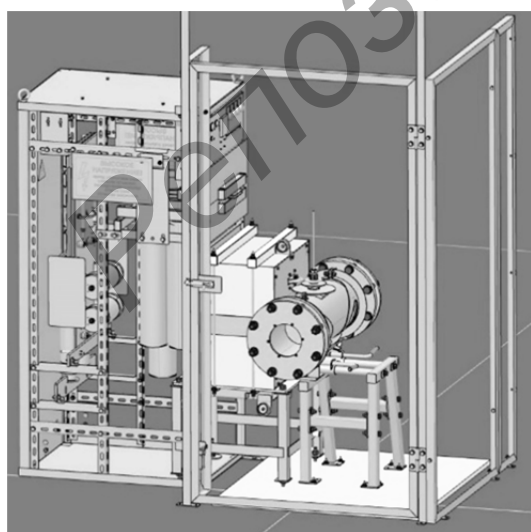
В связи с этим цель настоящей работы заключалась в определении влияния различных параметров работы ЭГУ на качество измельчения бурого угля для получения почвогрунтов.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на ЭГУ UniThorrr, разработанной специалистами белорусской научно-инжиниринговой компании ЗАО «Струнные технологии» (рисунок 1, а). Основными элементами установки являются генератор импульсных токов и рабочая камера. Рабочая камера с расположенными внутри неё отрицательным и положительным электродами представляет собой ёмкость, в которую загружают бурый уголь и подают воду. Упрощённая электрическая схема ЭГУ представлена на рисунке 1, б.

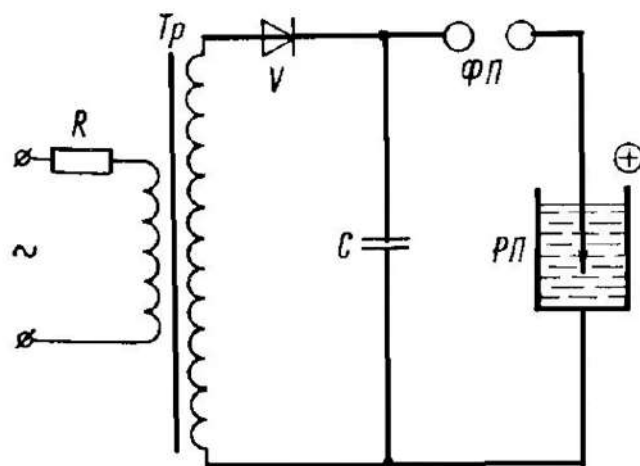
Установка работает следующим образом. От высоковольтного трансформатора T_p через выпрямитель V и зарядное сопротивление R заряжается конденсаторная батарея C . Напряжение заряда конденсатора измеряется с помощью киловольтметра. При достижении требуемого напряжения по воздушному промежутку ФП происходит подача напряжения на положительный электрод, расположенный в рабочей камере. Замыкание разрядного промежутка РП осуществляется искровым пробоем в жидкости между положительным и отрицательным электродами, расположенными внутри рабочей камеры. Отрицательный электрод представляет собой металлическую пластину, встроенную в дно камеры, положительный имеет вид «карандаша» из диэлектрика, внутри которого находится металлический пруток.

Данная установка разрабатывалась для измельчения бурого угля и обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными моделями:

- 1) улучшенная конструкция, обеспечивающая минимальную индуктивность разрядного контура при высоких скоростях нарастания тока;
- 2) компактность, позволяющая использовать её в передвижных мобильных комплексах;



а)



б)

Рисунок 1. — ЭГУ UniThorrr: а — модель; б — упрощённая электрическая схема

3) оснащённость автоматизированной системой мониторинга высоковольтных импульсов. Это даёт возможность обслуживающему персоналу оперативно отслеживать эффективность работы установки;

4) модернизированная конструкция положительного электрода, способствующая увеличению ресурса его работы в жидкой среде с повышенной удельной электропроводностью.

Основные технические характеристики, обеспечивающие работу ЭГУ UniThott: энергия в импульсе — 300 Дж, зарядное напряжение — от 40 до 50 кВ, сила тока — 15...20 кА, ёмкость конденсаторной батареи C — от 0,2 до 0,4 мкФ, объём рабочей камеры — 9 л, длина разрядного промежутка — от 10 до 50 мм.

Для проведения исследований был использован бурый уголь двух месторождений марки Б1: российский и казахстанский. Диапазон исходной фракции составлял от 0 до 50 мм. Масса загрузки варьировалась от 1,0 до 2,5 кг. В качестве рабочей жидкости использовали водопроводную воду. Объём воды, загружаемый в разрядную камеру, зависел от соотношения «уголь / вода» и массы загрузки.

Бурый уголь определённой фракции или нефракционированный (в зависимости от целей эксперимента) в виде водоугольной суспензии загружался в рабочую камеру и обрабатывался от 0 до 60 мин. Через заданный промежуток времени проводился отбор проб. Время отбора варьировалось от 2 до 10 минут. Гранулометрический анализ образцов ситовым методом проводили по методике [8]. Для количественной оценки частиц размером менее 500 мкм использован метод лазерной дифракции на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22. Микрофотографии с определением химического состава зольных остатков бурого угля получали с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-5610LV с системой химического анализа JEOL JED-2201. Определение гуминовых веществ в буром угле проводили по методике [9], зольность — по [10].

Результаты исследования и их обсуждение. Для оценки качества измельчения проводился гранулометрический анализ с построением гистограмм распределения частиц для каждого образца. Анализ гистограмм показал эффективное измельчение бурого угля в течение 10 мин с получением частиц менее 150 мкм, подходящих для получения почвогрунтов, биогумуса, органических удобрений. Проведённый анализ гистограмм образцов показал, что полученный методом электрогидравлического удара измельчённый бурый уголь полидисперсен, о чём свидетельствуют несколько (2-3) пиков на гистограммах.

На рисунке 2 представлены данные по распределению частиц по размеру фракции менее 400 мкм: около 30 % приходится на частицы размером 100...200 мкм, 25 % — 50...100 мкм, 20 % — 20...50 мкм, 10 % — менее 20 мкм, остальное — 200...400 мкм.

При тонком измельчении природных материалов наблюдается два одновременно протекающих процесса: разрушение частиц внешней силой и самопроизвольная агрегация частиц. Оба процесса зависят от природы внешней среды и условий её взаимодействия с частицами измельчаемого материала. При тонком измельчении вследствие относительно развитой поверхности частиц влияние среды на процесс измельчения особенно велико.

В процессе проведения исследований установлено, что увеличение времени обработки более 10 мин не приводит к значительному увеличению доли частиц размером менее 250 мкм (рисунок 3): 35 % приходится на частицы с размером 100...200 мкм, 25 % — на частицы размером 50...100 мкм, 15 % — 20...50 мкм. Это связано с протеканием указанных выше процессов — измельчением и коагуляцией. Возможно, при переходе на камеру непрерывного режима работы при отведении суспензии с частицами менее 250 мкм скорость процесса коагуляции будет снижена.

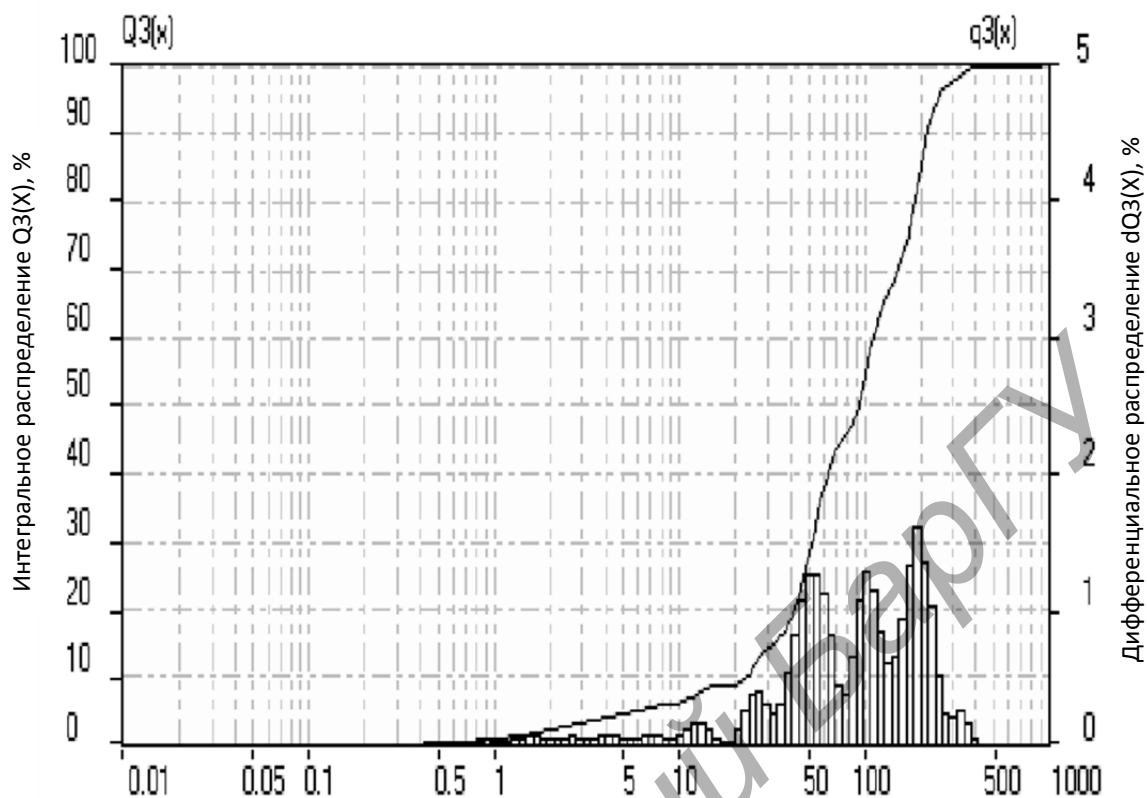


Рисунок 2. — Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения частиц бурого угля после измельчения на ЭГУ UniThorr в течение 10 мин

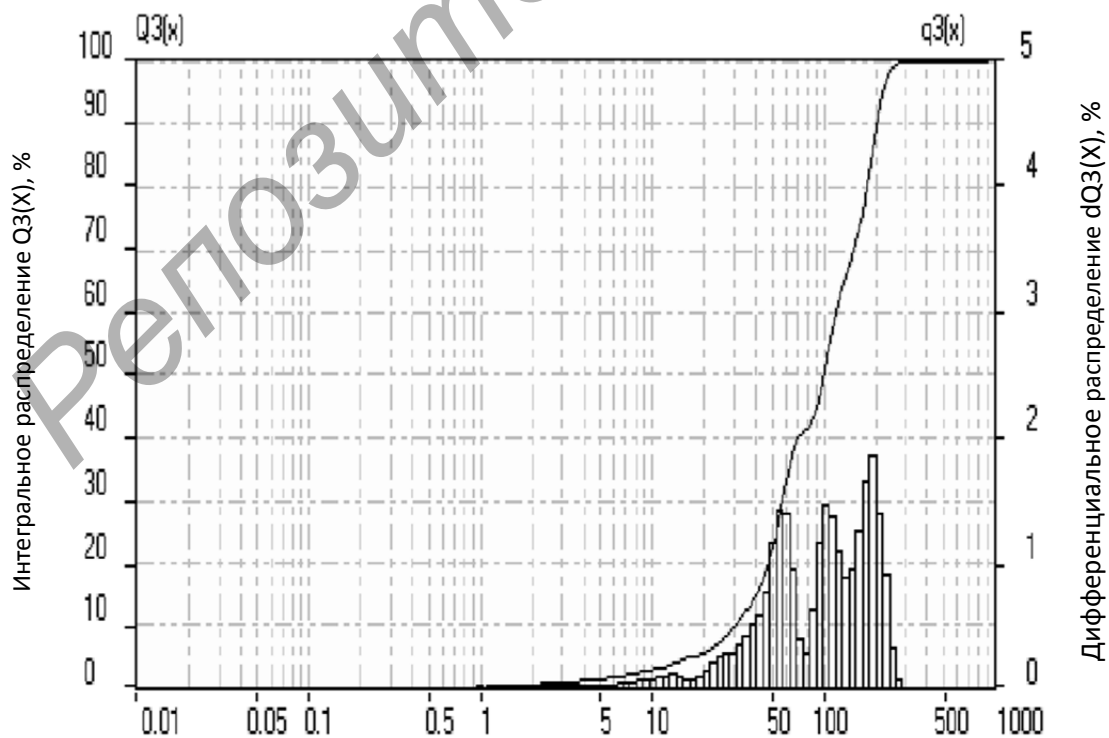


Рисунок 3. — Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения частиц бурого угля после измельчения на ЭГУ UniThorr в течение 15 мин

Чем шире диапазон изменения размеров частиц при неизменном среднем диаметре, тем больше общее число частиц, а значит, и число контактов между ними. Важно при этом не только снизить пустотность, но и уменьшить средний размер пор. Снизить пустотность можно добавлением частиц размером менее 100 мкм путём разделения водоугольной суспензии в проточном режиме с применением системы осветления (рисунки 4, 5). Таким образом, получается многокомпонентная смесь с более компактной структурой.

Использование в данном случае «гибкой» технологической схемы обеспечивает возможность варьирования характеристик исходного и готового продуктов за счёт изменения режимов работы оборудования, т. е. получения суспензии с требуемым содержанием частиц заданных размеров.

Исследования влияния размера исходной фракции показали, что между результатами измельчения исходной фракции угля с размерами 3...5, 5...7 и 7...50 мм нет значительных различий, поэтому дальнейшие эксперименты проводились с исходной фракцией угля 7...50 мм. Это связано с тем, что частицы более крупного размера разрушаются быстро и дальнейшее измельчение происходит с такой же скоростью, как и для фракции 3...5 мм.

В зависимости от размера исходной фракции и времени обработки исследовали измельчённый бурый уголь на электронном сканирующем микроскопе. Использование исходного нефракционированного бурого угля (размер фракции угля — 0...50 мм) приводит к ухудшению качества измельчения даже при более длительном измельчении (более 15 мин). Форма частиц имеет более вытянутую форму. Полученный измельчённый бурый уголь имеет высокую неоднородность состава (рисунок 6).

При использовании фракционированного бурого угля (фракции 3...5, 5...7, 7...50 мм) после измельчения на ЭГУ наблюдается однородность измельчения с получением частиц более округлой формы (рисунок 7).

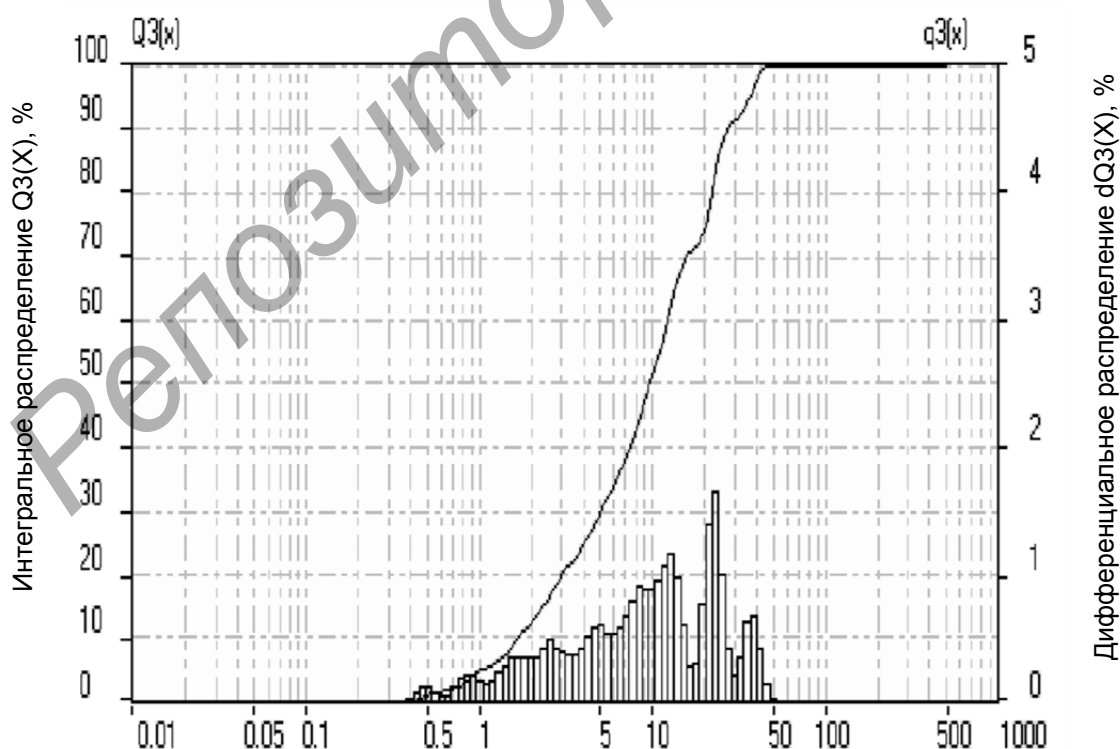


Рисунок 4. — Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения частиц бурого угля после измельчения на ЭГУ UniThorr из системы осветления

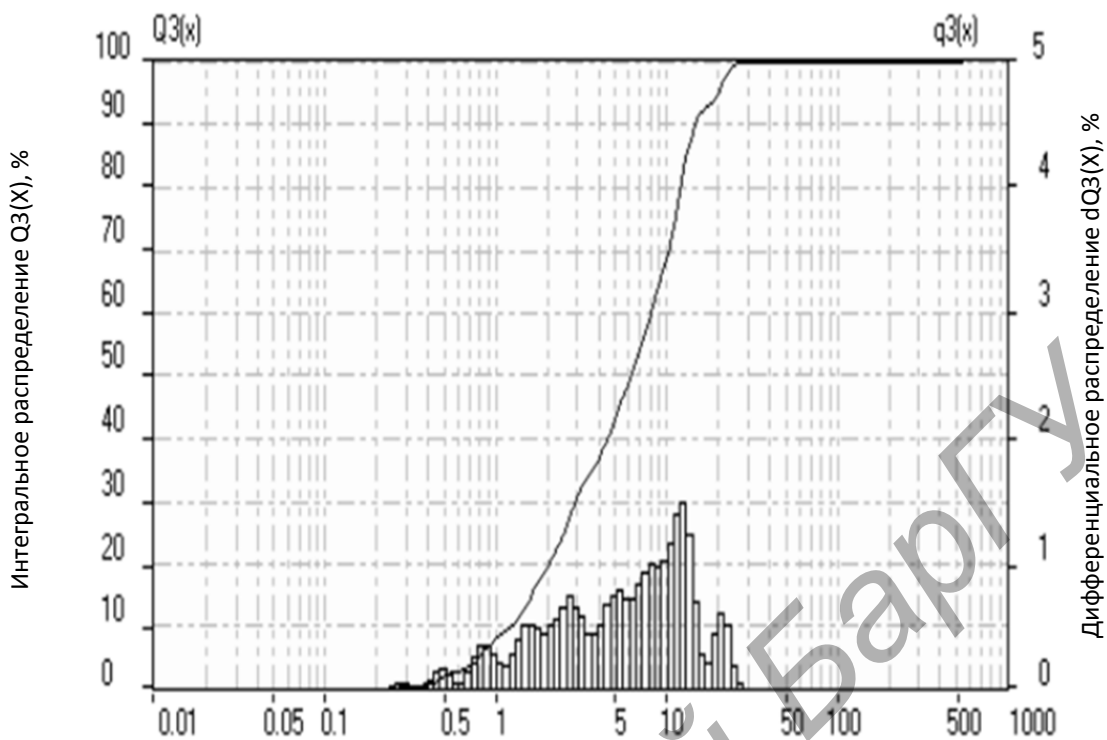


Рисунок 5. — Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения частиц бурого угля после измельчения на ЭГУ UniThorr из системы освещения



Рисунок 6. — Электронно-микроскопическое изображение структуры образца бурого угля (без предварительного фракционирования) после измельчения в течение 15 мин

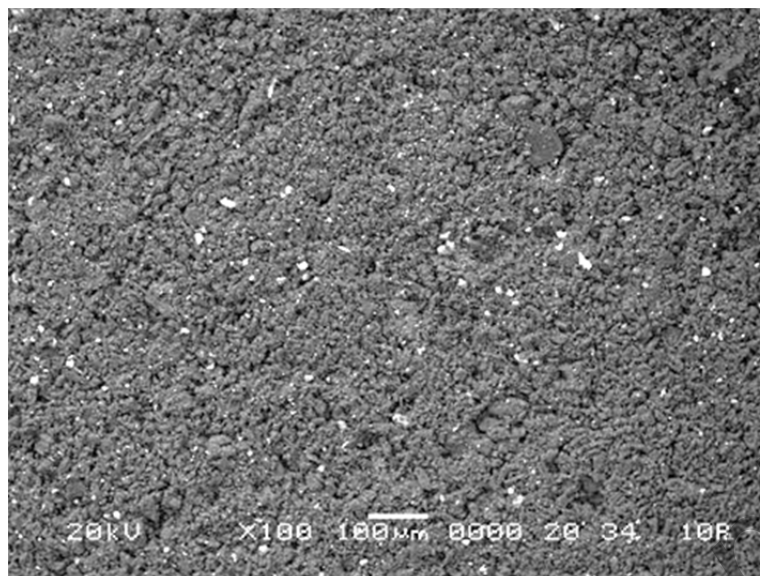


Рисунок 7. — Электронно-микроскопическое изображение структуры образца бурого угля (исходная фракция — 3...5 мм) после измельчения в течение 10 мин

Исследования влияния природы исходного сырья показали, что на начальном этапе измельчения физико-химические свойства угля оказывают влияние на работу установки и требуют корректировки технологического процесса с учётом особенностей сырья. На конечный результат измельчения после корректировки параметров работы ЭГУ природа сырья практически не влияет. Таким образом, параметры установки необходимо подбирать под конкретное исходное сырьё.

Основное влияние на корректировку параметров оказывает такой параметр, как удельная электропроводность водоугольной суспензии, которая зависит от содержания в буром угле водорастворимых минеральных веществ. Бурый уголь состоит из минеральной и органической составляющих, причём на минеральную часть может приходиться до 45 % и более от общей массы угля. В нашем случае зольность составляла 12,6 и 3,6 % (таблица 1).

Таблица 1. — Изменение параметров бурого угля после обработки на ЭГУ

Наименование сырья	Время обработки, мин	Количество импульсов, шт.	Зольность, %	Удельная электропроводность, мкСм / см	Массовая доля гуминовых веществ, %		
					Всего, %	из них	
						ГК	ФК
Бурый уголь казахстанский	0	0	12,6	290	29,3	16,9	12,2
	3	134	8,3	950	34,4	19,3	15,1
	6	360	7,9	1 280	33,4	18,2	15,2
	12	720	7,4	1 520	35,8	20,5	15,3
Бурый уголь российский	0	0	3,6	290	29,6	13,4	16,2
	3	134	3,3	610	32,2	15,9	16,3
	6	360	3,5	640	40,8	16,6	24,2
	12	720	3,5	960	38,9	15,3	23,6

Примечание. ГК — гуминовые кислоты, ФК — фульвовые кислоты.

Повышение удельной электропроводности свыше 1 200 мкСм / см приводит к ухудшению качества измельчения за счёт того, что полезная работа импульса идёт главным образом на нагрев рабочей среды.

Экспериментально установлено, что в процессе работы установки удельная электропроводность увеличивается за счёт перехода в водный раствор водорастворимых минеральных компонентов бурого угля (например, зольность казахстанского бурого угля снижается до 40 %) (см. таблицу 1). Химический анализ зольного остатка измельчённого угля показал снижение содержания ряда элементов, которые переходят в раствор: кальций — с 1,48 до 0,37 % масс., магний — с 0,16 до 0,04 % масс., натрий — 0,02 до 0,005 % масс.

Кроме того, обработка бурого угля на ЭГУ UniThorг приводит к увеличению общего выхода гуминовых веществ на 18...27 % (см. таблицу 1), что связано с разрывом химических связей в процессе измельчения, а значит, и повышением их лабильности. При этом существенно увеличивается выход фульвовых кислот, чем гуминовых.

Увеличение выхода гуминовых веществ и водорастворимых солей благоприятно сказывается на характеристиках почвогрунтов, так как данные компоненты необходимы для роста и развития растений [4—6].

Влияние размера рабочего зазора между положительным и отрицательным электродами весьма значимо, особенно при увеличении удельной проводимости среды. Оптимальный рабочий зазор составлял 30...35 мм для данной рабочей камеры и одинаковых условий работы установки. Увеличение рабочего зазора приводит к снижению качества измельчения и увеличению доли частиц размером более 250 нм.

Экспериментально подтверждено, что получаемый гранулометрический состав угля зависит от природы сырья, технологических параметров (загрузка, время измельчения, удельная проводимость среды и др.), параметров самой установки (энергия в импульсе, рабочий зазор, индуктивность, частота импульсов и др.).

Таким образом, на основании полученных данных были определены требования к исходному сырью и подобраны оптимальные режимы работы ЭГУ UniThorг в зависимости от характеристик исходного сырья: рабочий зазор — 30...40 мм; время работы — до 10 мин (до 600 импульсов); объём подаваемого угля — 1,0...1,5 л; объём жидкости — до 5,0 л; исходная фракция — 7...50 мм. Дальнейшая работа будет направлена на увеличение эффективности работы ЭГУ и улучшение её конструктивных элементов.

Заключение. Приведены краткие результаты исследований по измельчению бурого угля на ЭГУ как компонента почвогрунтов и жидких органических гуминовых удобрений. Описаны основные результаты по влиянию различных технологических параметров на качество измельчения бурого угля:

- природа сырья влияет на скорость измельчения бурого угля, величину удельной электропроводности водоугольной суспензии, что потребовало разработки «гибкой» технологической схемы измельчения на ЭГУ;

- размер исходной фракции (до 50 мм) не оказывает существенного влияния на качество измельчения исходного сырья, что позволило исключить стадию предварительного фракционирования перед загрузкой сырья в рабочую камеру;

- величина рабочего зазора между электродами зависит от электрических параметров ЭГУ и удельной проводимости рабочей среды.

Список цитированных источников

1. *Агроскин, А. А.* Химия и технология угля / А. А. Агроскин. — М. : Недра, 1969. — 240 с.
2. uTerra — Биогумус [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://big-fish.by/catalog/yuniterra-innovatsionnoe-zemledelie/>. — Дата доступа: 25.09.2023.
3. Мелиорант-почвоулучшитель «Гумус Uniterra». Технические условия : ТУ ВУ 691935133.002-2019. — Введ. 19.03.2019. — Минск : Госстандарт : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2019. — 12 с.
4. *Юницкий, А. Э.* Использование кровель зданий различного назначения под размещение оранжерей: особенности и оптимальные решения. Перспективные составы и способы производства лёгких почвогрунтов для ЭкоКосмоДома / А. Э. Юницкий, М. М. Давыдик, Н. С. Зыль // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23—24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии» ; под общ. ред. А. Э. Юницкого. — Минск : СтройМедиаПроект, 2023. — С. 136—151.
5. Плодородие и физико-химические показатели «космических» почвогрунтов для ЭкоКосмоДома / А. Э. Юницкий [и др.] // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23—24 сент. 2021 г. / ООО «Астроинженерные технологии» ; под общ. ред. А. Э. Юницкого. — Минск : СтройМедиаПроект, 2022. — С. 312—328.
6. Перспективные составы и способы производства лёгких почвогрунтов для ЭкоКосмоДома / А. Э. Юницкий [и др.] // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23—24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии» ; под общ. ред. А. Э. Юницкого. — Минск : СтройМедиаПроект, 2023. — С. 250—261.
7. *Юткин, Л. А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. — Л. : Машиностроение, 1986. — 253 с.
8. Топливо твёрдое. Ситовый метод определения гранулометрического состава : ГОСТ 2093-82. — Взамен ГОСТ 2093-77 ; введ. 01.01.97. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 2001. — 19 с.
9. ГОСТ 9517-76. Угли бурые и каменные. Методы определения выхода гуминовых кислот. — Взамен ГОСТ 9517-69 ; введ. 01.07.77. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 1987. — 6 с.
10. Топливо твёрдое минеральное. Определение зольности : ГОСТ 55661-2013. — Введ. 01.01.2015. — М. : Стандартинформ, 2014. — 29 с.

Поступила в редакцию 20.10.2023.