

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОУДАРА В ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

*А. Э. Юницкий<sup>1</sup>, Н. С. Першай<sup>2</sup>, С. А. Арнаут<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Генеральный конструктор, ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь, a@unitsky.com

<sup>2</sup> Инженер-исследователь, ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь, n.pershai@unitsky.com

<sup>3</sup> Начальник КБ «Опытное оборудование», ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь, s.arnaut@unitsky.com

### **Аннотация**

В работе представлена информация об использовании электрогидравлической установки для получения водоугольной суспензии в качестве компонента технологии получения водоугольного топлива. Представлены основные результаты по получению водоугольной суспензии бурого угля на электрогидроударной установке UniThorr. Установлено влияние различных параметров работы установки (рабочий зазор, размер исходной фракции, загрузка, природа исходного сырья) на качество измельчения бурого угля. Показана возможность получения водоугольной суспензии с размерами частиц менее 250 мкм, что подтверждает возможность использования её в качестве компонента водоугольного топлива.

**Ключевые слова:** водоугольное топливо, водоугольная суспензия, электрогидравлический удар, бурый уголь, измельчение, дисперсионный анализ.

## USE OF ELECTRIC HYDRAULIC IMPACT FOR PREPARING OF WATER COAL FUEL

*A. Unitsky<sup>1</sup>, N. Pershai<sup>2</sup>, S. Arnaut<sup>3</sup>*

### **Abstract**

The article provides information on the use of an electro-hydraulic installation for producing a coal-water suspension as a component in the technology for producing coal-water fuel. It reflects the main results of the production of coal-water suspension from brown coal using the electro-hydraulic shock installation. The authors established the influence of various parameters of the installation (working gap, size of the initial part, loading, initial source) on the quality of grinding the nature of brown coal. They showed the possibility of obtaining a coal-water suspension with particle sizes less than 250 microns which confirms the possibility of using it as a component of coal-water fuel.

**Keywords:** water coal fuel, electrohydraulic impact, brown coal, shredding, analysis of variance.

**Введение.** Проблема обеспечения человечества, и населения Республики Беларусь в том числе, топливом и энергией, остро стоит как в настоящее время, так и в обозримом будущем. Одной из ключевых причин ее возникновения является дефицит энергоресурсов, большая часть которых импортируется. Поэтому повышение эффективности использования энергии, а также использования собственных природных источников сырья является одним из важных условий устойчивого развития национальной экономики. Это приводит к тому, что развитие комплексных и нетрадиционных подходов в использовании природного сырья является альтернативой общепризнанным и широко применяемым технологиям получения энергии. Так, применение бурого угля в качестве источника энергии известно давно. Однако использование его для получения энергии в виде водугольного топлива (ВУТ) получило широкое распространение в таких странах, как Китай и Япония. В частности, потребление угля в Китае за последний год выросло на 4,6 % и в 2022 году достигло максимального в истории страны значения в 4,5 млн тонн [1].

ВУТ представляет собой композиционную дисперсную систему, состоящую, как правило, из твёрдой фазы в виде мелкодисперсного угля, жидкой среды (вода) и пластифицирующего агента.

К основным преимуществам использования ВУТ относят [2]:

– экологические:

- пожаро- и взрывобезопасность при производстве, хранении, транспортировке и применении;
- снижение количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, таких как пыль, зола, оксиды азота и серы;
- уменьшение количества образующейся золы за счет более полного сгорания;

– технологические:

- при переводе теплогенерирующих установок на сжигание ВУТ не требуются существенные изменения конструкции установленных котлов (агрегатов);
- возможность полной механизации всех процессов (приготовление, транспортирование и использование);
- уменьшение температуры воспламенения с сохранением высокой степени сгорания горючей массы (97 %);
- возможность транспортирования несколькими видами транспорта (трубопроводным, железнодорожным, автомобильным, морским);
- сохранность технологических свойств при хранении и транспортировании;

– экономические:

- снижение стоимости 1 т у. т. за счет уменьшения эксплуатационных затрат на хранение, транспортировку и сжигание;
- уменьшение капитальных затрат при переводе ТЭЦ со сжигания природного газа и мазута на ВУТ;
- расчетный срок окупаемости не превышает 3 лет [2].

Но существуют и недостатки, препятствующие более широкому применению ВУТ в энергетике, среди которых:

- отсутствие утверждённой нормативно-технической базы (стандартов, технических условий, ГОСТов) в Республике Беларусь;
- низкие показатели стабильности технологических характеристик (седиментационной устойчивости).

Основные стадии приготовления ВУТ:

- предварительная подготовка угля (обогащение, сушка и т. д.);
- измельчение угля с получением водоугольной суспензии;
- добавление пластификатора.

Технологические свойства ВУТ определяются содержанием твердой фазы (угля), её дисперсностью, вязкостью, седиментационной устойчивостью, составом и свойствами химических добавок, содержанием минеральных примесей.

В таблице 1 представлены значения технологических свойств ВУТ.

**Таблица 1** – Технологические свойства ВУТ [3–8]

Показатель, единица измерения	Значения
Массовая доля твёрдой фазы (угля), %	58–70
Гранулометрический состав, мкм	менее 250
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	около 1200
Зольность твёрдой фазы, %	5–50
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	2300–4700
Вязкость, при скорости сдвига 81 с <sup>-1</sup> , мПа·с	до 1000
Температура воспламенения, °С	450–650
Температура горения, °С	900–1150
Температура замерзания (без добавок), °С	0
Статическая стабильность, сут.	
– без применения добавок	до 5
– с применением добавок	от 30

Определяющим параметром водоугольной суспензии для получения ВУТ является гранулометрический состав, поэтому важно правильно подобрать оборудование для измельчения. При этом данная стадия технологического процесса является ещё и самой энергозатратной. Подбор оборудования для измельчения угля со сниженным энергопотреблением позволит снизить технологические затраты на производство топлива.

В качестве альтернативы традиционным способам измельчения угля обращают на себя внимание электрогидродарные установки (ЭГУ) [9–10]. Использование ЭГУ в промышленности достаточно разнообразно [9]. Известно о более чем 35 направлениях применения их в таких сферах, как машиностроение, добыча полезных ископаемых, строительство, горное дело, медицина, сельское хозяйство, экология, энергетика: дробление материалов, обогащение руд, извлечение остаточных полезных ископаемых из отвалов, разрушение различного рода объектов, смешивание растворов, очистка поверхностей и др.

Принцип работы ЭГУ основан на электрогидравлическом эффекте, сущность которого заключается в преобразовании электрической энергии в механическую

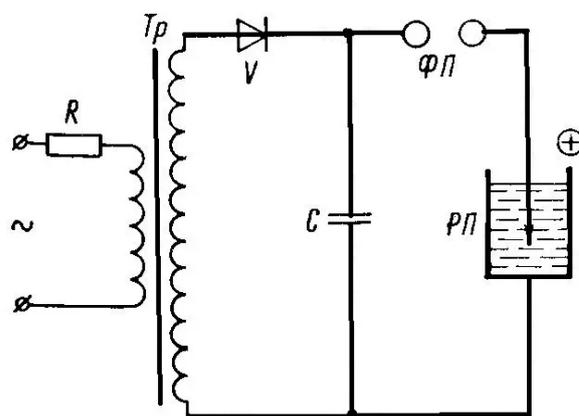
с высоким КПД. Происходит это за счёт того, что внутри объема жидкости протекает специально сформированный импульсный электрический разряд, вокруг зоны его образования возникают сверхвысокие импульсные давления, способные совершать механическую работу и сопровождающиеся комплексом физико-химических явлений [9]. Один из главных плюсов использования электрогидроударной технологии – экологичность, пожар- и взрывобезопасность.

Цель настоящей работы заключается в определении влияния различных параметров работы ЭГУ на измельчение бурого угля для получения водоугольной суспензии как исходного компонента ВУТ.

**Материалы и методы.** Исследования проводились на ЭГУ UniThorr, разработанной специалистами белорусской научно-инжиниринговой компании ЗАО «Струнные технологии» (рисунок 1а).



а



б

а – внешний вид рабочей камеры ЭГУ UniThorr, б – упрощённая электрическая схема  
 $R$  – зарядное сопротивление,  $Tr$  – трансформатор,  $V$  – выпрямитель, ФП – формирующий искровой промежуток, РП – рабочий и искровой промежуток,  $C$  – рабочая ёмкость конденсатора

**Рисунок 1** – Внешний вид и упрощенная электрическая схема ЭГУ UniThorr

Данная установка разрабатывалась для измельчения природных материалов, в частности бурого угля, с учетом недостатков традиционных моделей ЭГУ и обладает рядом уникальных особенностей:

- улучшенная конструкция установки, которая обеспечивает минимальную индуктивность разрядного контура при больших скоростях нарастания тока;
- компактность, позволяющая использовать установку в передвижных мобильных комплексах;
- оснащённость специально разработанной автоматизированной системой мониторинга высоковольтных импульсов, позволяющая оператору в режиме реального времени отслеживать эффективность работы ЭГУ;

– улучшенная конструкция положительного электрода, способствующая увеличению ресурса его работы в среде с высокой электропроводностью.

Основными составными частями ЭГУ являются генератор импульсных токов и рабочая камера. Рабочая камера состоит из емкости, внутри которой находится обрабатываемый материал, технологическая жидкость, отрицательный и положительный электроды. Упрощенная электрическая схема ЭГУ представлена на рисунке 1 (б). Некоторые технические характеристики ЭГУ UniThorr: рабочее напряжение – 40–55 кВ, энергия в импульсе – 300 Дж.

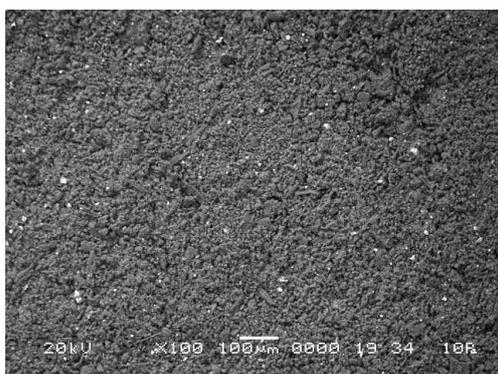
ЭГУ работает следующим образом. От высоковольтного трансформатора через выпрямитель и зарядное сопротивление заряжается конденсаторная батарея. При достижении требуемого напряжения по воздушному промежутку происходит подача напряжения на положительный электрод, расположенный в рабочей камере. Замыкание разрядного промежутка 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 прут.

Для проведения исследований использован бурый уголь двух месторождений марки Б1: российский и казахстанский. Диапазон исходной фракции составлял от 0 до 50 мм. В качестве рабочей жидкости использовали водопроводную воду. Бурый уголь в виде водоугольной суспензии загружался в рабочую камеру и обрабатывался в течение заданного времени (от 0 до 60 мин).

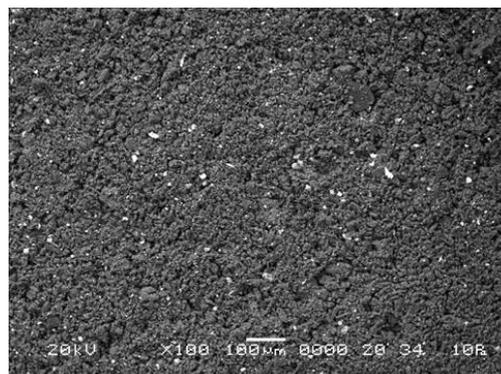
**Результаты и обсуждение.** Согласно основным техническим параметрам ВУТ (таблица 1), размеры частиц угля не должны превышать 250 мкм. Влияние крупности частиц угля на вязкость сказывается в зависимости от размеров частиц и от распределения частиц в полидисперсной угольной фазе. Для соблюдения других параметров ВУТ, таких как вязкость, седиментационная устойчивость, необходимо использовать более мелкую фракцию с размерами частиц менее 150 мкм. Правильно подобранный гранулометрический состав твердой фазы позволяет снизить динамическую вязкость и увеличить стабильность суспензии [3–8].

В настоящей работе проводилось исследование влияния электрогидравлического удара с энергией в импульсе 300 Дж на измельчение бурого угля различного происхождения, определялись основные параметры, влияющие на процесс измельчения.

Исследования влияния размера фракции показали, что между результатами измельчения угля разной фракции нет видимого различия (при установленных режимах). Это связано с тем, что частицы более крупного размера разрушаются быстро и дальнейшее измельчение происходит с такой же скоростью, как и для самой маленькой фракции (рисунок 2).



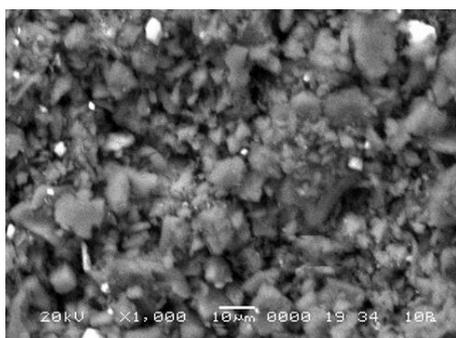
фракция 3–5 мм



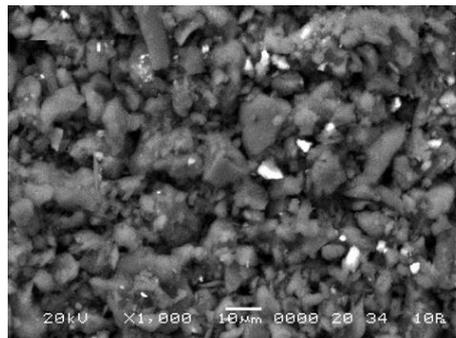
фракция 7–50 мм

**Рисунок 2** – Электронно-микроскопические изображения структуры образцов бурого угля с различной исходной фракцией после 15 мин измельчения (кратность увеличения  $\times 100$ )

Проведённые исследования показали эффективное дробление крупных фракций угля размером 7–50 мм в течение 15 мин. Увеличение времени измельчения угля более 20 мин независимо от размера исходной фракции угля приводит к получению образцов с визуально одинаковым гранулометрическим составом и однородностью измельчения, однако изменяется форма частиц с округлой на более вытянутую (рисунок 3).



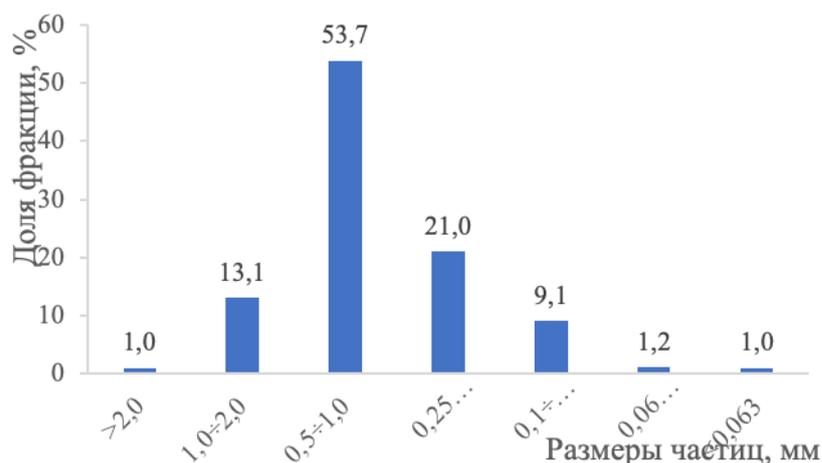
фракция 3–5 мм



фракция 7–50 мм

**Рисунок 3** – Электронно-микроскопические изображения структуры образцов бурого угля с различной исходной фракцией после 15 мин измельчения (кратность увеличения  $\times 1000$ )

Влияние размера рабочего зазора между положительным и отрицательным электродом весьма значимо, особенно при увеличении проводимости рабочей среды. Оптимальный рабочий зазор составил 30–35 мм для данной рабочей камеры и одинаковых условиях работы установки. Увеличение рабочего зазора приводит к снижению качества измельчения и появлению частиц с размером более 250 нм (рисунок 4).



**Рисунок 4** – Гранулометрический анализ образца бурого угля после измельчения в течение 15 мин при рабочем зазоре 50 мм

Область эффективного измельчения в рабочей камере определяется параметрами ЭГУ и ограничена размером кавитационного пузыря (рисунок 5), поэтому существенное влияние на эффективность измельчения бурого угля оказывает размер рабочей камеры. Проведённые исследования показали, что увеличение её диаметра приводит к снижению производительности установки. Это обусловлено тем, что в процессе электрогидроудара более крупные частицы угля разбрасываются и оседают по краям камеры, не попадая в область кавитационного пузыря и не принимая участия в процессе измельчения. Увеличение загрузки камеры в данном случае не позволяет решить проблему и приводит к ещё большему ухудшению работы ЭГУ.

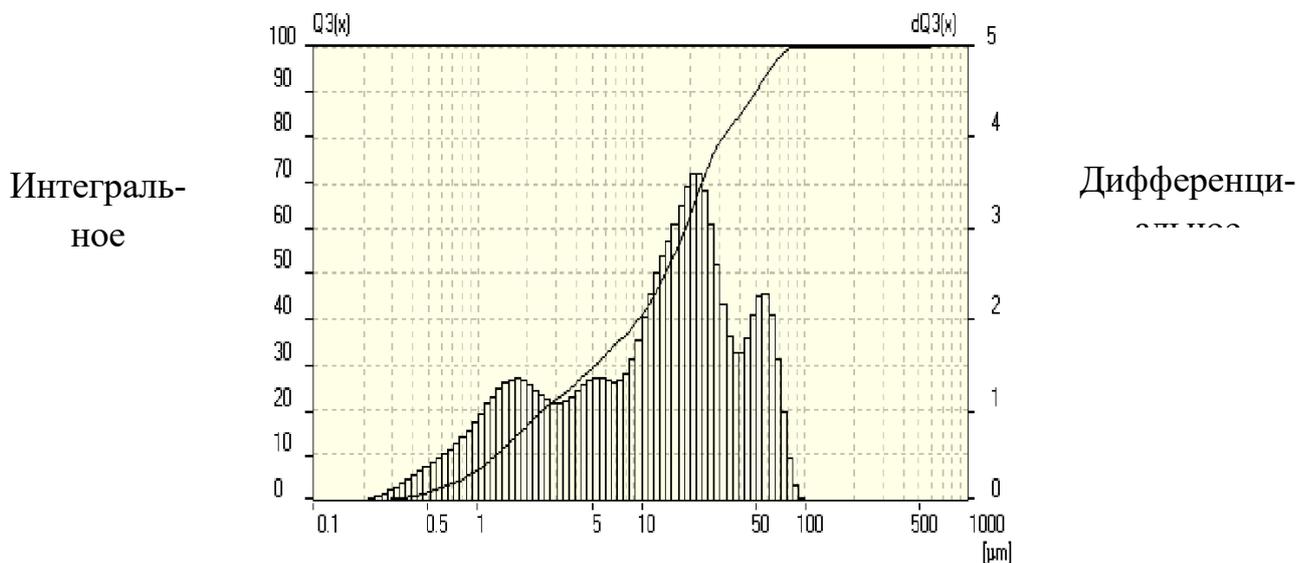


**Рисунок 5** – Изображение кавитационного пузыря при протекании электрогидравлического удара в жидкости

Увеличение времени обработки угля ожидаемо приводит к улучшению качества дробления. Однако времени обработки в диапазоне 10–15 мин достаточно для получения частиц размером  $\leq 250$  мкм более 75 % (рисунок 6).

Дальнейшее увеличение времени обработки (более 15 мин) не приводит к значительному увеличению доли частиц меньшего размера. Это, вероятно, обусловлено тем, что при длительной обработке в дискретных камерах протекают два противоположных процесса – измельчение и коагуляция. При протекании про-

цесса в камере непрерывного режима работы при отведении суспензии с частицами менее 250 мкм для разделения их на гидроциклонах влияние процесса коагуляции снижается и частиц меньшего размера становится больше.



**Рисунок 6** – Интегральная и дифференциальная кривые распределения частиц бурого угля после измельчения в течение 10 мин

В работе использовали два вида сырья, физико-химические свойства которых отличаются. При использовании казахского бурого угля наблюдается значительный рост удельной электропроводности водоугольной суспензии от 1000–1100 до 1800 мкСм/см и выше (для сравнения средняя удельная электропроводность суспензии российского бурого угля составляет 700–800 мкСм/см). Такая проводимость приводит к снижению работоспособности установки, появлению так называемых «холостых» разрядов. Данный недостаток был устранён путём доработки конструкции ЭГУ и корректировки технологических параметров.

Исследование зависимости природы исходного сырья на качество измельчения показало, что во времени это влияние нивелируется. Выявлено, что природа сырья большее влияние оказывает на работу самой ЭГУ, чем на степень измельчения. Это следует учитывать при смене сырья путём корректировки параметров работы установки для выхода на заданную производительность.

**Заключение.** В данной работе приведены краткие результаты исследований по измельчению бурого угля на ЭГУ как компонента ВУТ.

1. 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 требует корректировки технологических параметров работу ЭГУ при его замене;

- размер исходной фракции (до 50 мм) не оказывает существенного влияния на качество измельчения исходного сырья, что позволяет исключить необходимость предварительно фракционирования сырья перед поступлением в рабочую камеру;

– конструкция рабочей камеры (в том числе ее диаметр) оказывает существенное влияние на эффективность измельчения бурого угля. Ее диаметр определяется исходя из технических характеристик ЭГУ;

– величина рабочего зазора между электродами зависит от электрических параметров ЭГУ и удельной проводимости рабочей среды;

2. Установлены оптимальные режимы работы ЭГУ UniThorr для получения водоугольной суспензии как компонента ВУТ (время измельчения для двух видов бурого угля, диаметр рабочей камеры, требуемая загрузка, размер исходной фракции, рабочий зазор).

3. Полученные результаты положены в основу дальнейших исследований по получению ВУТ.

### Список цитированных источников

1. China's coal use increased to a record high in 2022, IEA says [Electronic resource]. Mode access: <https://www.rfa.org/english/news/environment/coal-07282023072108.html>. – Date access: 25.08.23.
2. Тажибаев, К. Т. Перспективы применения водоугольного топлива в энергетике / К. Т. Тажибаев, Д. К. Тажибаев, К. О. Дуйшеев // Уголь. – 2020. – № 1. – С. 55–57.
3. Овчинников, Ю. В. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий / Ю. В. Овчинников, Е. Е. Бойко. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017. – 308 с.
4. Баранова, М. П. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий / М. П. Баранова, В. А. Кулагин. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2011. – 160 с.
5. Макаров, А. С. Водоугольное топливо на основе углей различной стадии метаморфизма / А. С. Макаров, Д. П. Савицкий, А. И. Егурнов // Современная наука: сборник научных статей. – 2011. – № 1(6). – С. 16–20.
6. Савицкий, Д. П. Реологические свойства водоугольных суспензий на основе бурых углей в присутствии натриевых лигносульфонатов и щелочи / Д. П. Савицкий, А. С. Макаров, В. А. Завгородний // Химия твёрдого топлива. – 2009. – № 5. – С. 73–77.
7. Водоугольное топливо на основе антрацита / К. В. Макарова [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 5. – С. 3–5.
8. Ходаков, Г. С. Водоугольные суспензии в энергетике / Г. С. Ходаков // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 35–45.
9. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
10. Морозов, А. Г. Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива / А. Г. Морозов, Н. В. Коренюгина // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 7 (119). – С. 18–21.