

## СОВМЕЩЕННЫЙ ПРОЦЕСС ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И СУШКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Опарин С.А., канд. техн. наук, доцент, Сорока П.Г., д-р техн. наук, профессор  
ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г.Днепропетровск

*Установлено закономерности влияния технологических параметров совмещенного процесса тонкого измельчения и сушки растительных отходов на характеристики продуктов измельчения. Разработана, спроектирована и изготовлена установка совмещенного процесса тонкого измельчения и сушки растительных отходов.*

*The regularities of influence of technological parameters of the combined process of fine grinding and drying plant waste on characteristics of products of grinding. Developed, designed and manufactured installation of the combined process of fine grinding and drying plant waste.*

Ключевые слова: растительные отходы, тонкое измельчение, сушка, дисперсность, мельница

Одним из направлений совершенствования технологических процессов является совмещение нескольких стадий в одном аппарате, что приводит к интенсификации процессов и к снижению капитальных затрат.

Одними из самых энергоемких процессов химической технологии являются процессы измельчения, в особенности процессы тонкого и сверхтонкого помола, а также процессы сушки.

Существует измельчающее оборудование, в котором процессы измельчения и сушки материала проводят совместно, при этом в качестве сушильного агента используют предварительно подогретый воздух или инертный газ, что значительно повышает энергозатраты процесса.

В работе [1] показано, что при тонком помоле материалов в мельницах ударно-отражательного действия выделяется значительное количество тепла. Это явление связано с ударным действием и трением частиц материала по рабочим поверхностям мельницы, возникновением новых поверхностей при разрушении, а также за счет турбулизации пылегазовой смеси в рабочей зоне мельницы. Таким образом, возникновение тепла при тонком помоле в мельницах ударно-отражательного действия позволяет объединить процессы измельчения и сушки различных материалов.

Объемы растительных отходов достигают значительных размеров. Так при переработке семян подсолнечника на маслоперерабатывающих предприятиях образуется более 400 тыс. т/год подсолнечниковой лузги, неиспользованные объемы пшеничной соломы достигают 4 млн. тонн/год, а при переработке риса образуется 20 млн т/год рисовой шелухи. То есть такие растительные отходы являются многотоннажными отходами сельскохозяйственного производства, однако, ввиду отсутствия рациональной технологии по их переработке до настоящего времени не нашли широкого применения, в особенности в химической технологии.

Многими исследователями установлена целесообразность применения в различных отраслях промышленности растительных отходов измельченных до 100 мкм. В частности, продукты тонкого измельчения растительных отходов могут являться конечным продуктом и могут быть использованы в качестве кормов в сельском хозяйстве [2,3,4,5] либо являться промежуточным продуктом в производстве пластиковых композитов [6,7], в технологиях получения диоксида кремния [9,10,11], карбида кремния [12,13] и т.д.

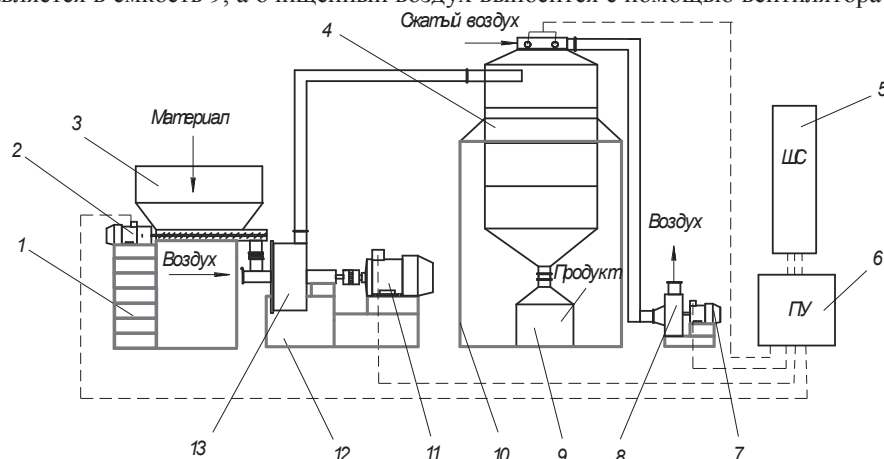
Существуют различные способы и устройства, предназначенные для тонкого измельчения растительных отходов [14]. Однако они требуют значительных энергозатрат и не позволяют получать продукт с заданными характеристиками, в частности дисперсностью и влажностью, что в значительной степени влияет на качество дисперсных материалов, которые получают из продуктов тонкого измельчения растительных отходов.

Проанализировав способы тонкого помола материалов и учитывая, что растительные отходы имеют волокнистую структуру, установлено, что наиболее рациональным способом помола данных видов материалов является комбинация ударных нагрузок и истирания. Ударные нагрузки способствуют разрушению волокнистой структуры, а стирающие нагрузки, которые действуют в поле интенсивных турбулентных потоков, приводят к деструкции волокон растительных материалов. Комбинация ударных и истирающих нагрузок позволяет получать из растительных отходов высокодисперсные продукты.

Поэтому целью представленной работы является разработка технологии и оборудования, позволяющие получать измельченный продукт из растительных материалов с заданными характеристиками.

Для проведения исследований изготовлена установка совмещенного процесса тонкого измельчения и сушки растительных отходов. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

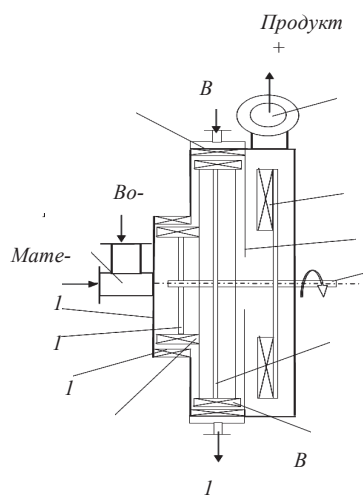
Установка работает следующим образом. Исходный материал из бункера питателем 3 с помощью шнека, который приводится в действие электродвигателем с частотным регулятором через редуктор 2, поступает в загрузочный патрубок мельницы 13. Пройдя стадию измельчения в ударно-отражательной мельнице, смесь продукта и воздуха выносятся из мельницы через разгрузочный патрубок и направляются в фильтр-циклон 4. В фильтре-циклоне происходит разделение пылевоздушной смеси на продукт и воздух. Очистление рукавных фильтров осуществляется с помощью сжатого воздуха, который подается в зависимости от гидравлического сопротивления фильтр-циклона. Отделенный от воздуха измельченный материал направляется в емкость 9, а очищенный воздух выносятся с помощью вентилятора 8.



1, 10, 12 – рама, 2 – электродвигатель с частотным регулятором; 3 – питатель, 4 – фильтр-циклон, 5 – силовой шкаф, 6 – пульт управления, 7 – электродвигатель вентилятора, 8 – вентилятор, 9 – емкость, 11 – электродвигатель мельницы, 13 – мельница

**Рис. 1 – Принципиальная схема установки совмещенного процесса тонкого измельчения и сушки растительных отходов**

На данной установке использована горизонтальная двухступенчатая ударно-отражательная мельница с пороговой сепарацией (рис. 2), которая работает следующим образом.



1-загрузочный патрубок; 2,10-отбойные элементы; 3-разгрузочный патрубок; 4-разгрузочное устройство; 5-сепаратор; 6-вал; 7,11-диски ротора; 8,9-бильные элементы; 12-корпус.

**Рис. 2 – Схема горизонтальной ударно-отражательной мельницы с пороговой сепарацией**

Исходный материал через загрузочный патрубок 1 поступает в корпус мельницы 2, где попадает на диск 11 первой ступени. За счет действия центробежной силы материал отбрасывается в зону интенсивного измельчения, которая создается бильными 9 и отбойными 10 элементами. Образовавшийся полидисперсный продукт поступает на диск 7 второй ступени с более высоким уровнем нагрузки. После второй ступени установлено сепарационное кольцо 5, с помощью которого происходит разделение продукта на мелкую и крупную фракции. При превышении аэродинамической силы, создаваемой разгрузочным устройством 4, над центробежной силой второй ступени ротора, измельченный материал выносятся из мельницы через разгрузочный патрубок 3.

Одним из параметров, влияющих на влажность измельченных растительных отходов, является температура пылегазовой смеси выходящей из мельницы. Необходимость контроля данной температуры обусловлена также с тем, что взрывозвеси из тонкоизмельченных растительных материалов пожаровзрывоопасны и поэтому повышенные температуры при тонком измельчении растительных отходов недопустимы.

В результате проведенных теоретических исследований установлена зависимость между температурой пылегазовой смеси, выходящей из мельницы, от технологических параметров процесса измельчения в мельнице ударно-отражательного действия [15].

$$t_2 = \frac{Q_d - Q_n + L_0(1 - X_0) \cdot [C_{с.в.} \cdot t_0 - X_0 \cdot (i_{n2} - i_{n0})] - \frac{G_0}{100 - \omega_2} \cdot [(100 - \omega_0) \cdot C_M]}{L_0 \cdot (1 - X_0) \cdot C_{с.в.} + \frac{G_0 \cdot (100 - \omega_0) \cdot C_M}{100 - \omega_2}} - \frac{\frac{G_0}{100 - \omega_2} \cdot [(\omega_0 - \omega_2) \cdot (i_{n2} - C_{вл.} \cdot t_0) - (100 - \omega_0) \cdot C_M \cdot t_0]}{L_0 \cdot (1 - X_0) \cdot C_{с.в.} + \frac{G_0 \cdot (100 - \omega_0) \cdot C_M}{100 - \omega_2}} \quad (1)$$

где

$Q_d$  - теплота, возникающая в рабочей зоне мельницы при измельчении (теплота измельчения), *Вт*;

$Q_n$  - потери тепла в окружающую среду, *Вт*;

$L_0$  - количество влажного воздуха, поступающего в мельницу, *кг/с*;

$X_0$  - влагосодержание исходного влажного воздуха, *кг/кг*;

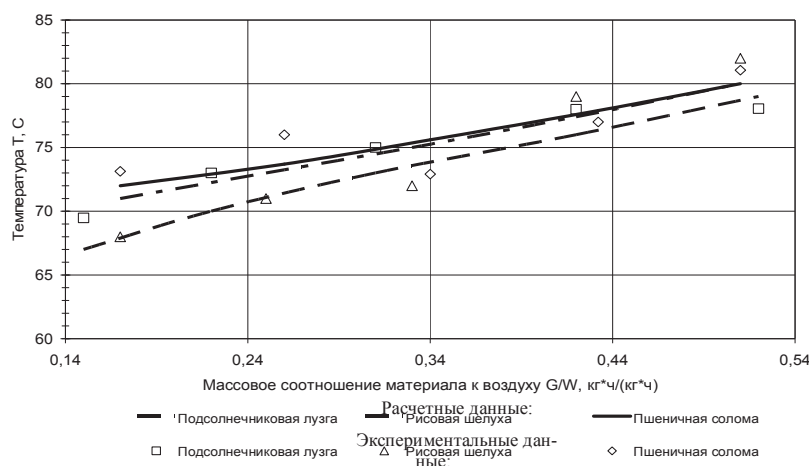
$C_{с.в.}, C_{вл.}, C_M$  - теплоемкость свежего воздуха, влажного материала и высушенного материала, соответственно, *кДж/кг·К*;

$t_0$  - температура влажного воздуха, поступающего в мельницу, *°С*;

$G_0$  - расход исходного материала, *кг/с*;

$\omega_0, \omega_2$  - начальная и конечная влажность воздуха, %

Для подтверждения полученной математической зависимости (1) по определению температуры пылевоздушной смеси, выходящей из мельницы, проведены экспериментальные исследования по влиянию массового соотношения материала к воздуху на конечную температуру пылевоздушной смеси при тонком измельчении различных видов растительных отходов.



**Рис. 3 – Зависимость температуры пылевоздушной смеси, выходящей из мельницы, от массового соотношения материала к воздуху и вида растительных отходов**

Как видно из результатов экспериментальных исследований, которые представлены на рис.3, увеличение массового соотношения материала к воздуху приводит к повышению температуры пылегазовой смеси, выходящей из мельницы, что связано с увеличением концентрации частиц в рабочей зоне мельницы. Так повышение массового соотношения материала к воздуху до  $G/W = 0,53$  кг·ч/кг·ч при измельчении подсолнечниковой лузги, рисовой шелухи и пшеничной соломы приводит к увеличению температуры пылегазовой смеси до 78-80 °С.

Сопоставление расчетных значений температур пылегазовой смеси и экспериментальных данных говорит о достоверности полученных результатов и возможности использования расчетной зависимости для определения температуры пылегазовой смеси, выходящей из мельницы.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что продукты измельчения из пшеничной соломы, подсолнечниковой и рисовой лузги не содержат частиц менее 100 мкм. Из результатов экспериментальных данных, которые представлены на рис. 4, видно, что содержание фракции менее 63 мкм в измельченных растительных материалах составляет 96-100%. Повышение массового соотношения материала к воздуху приводит к незначительному снижению дисперсности за счет снижения турбулизации пылегазовой смеси в рабочей зоне мельницы.

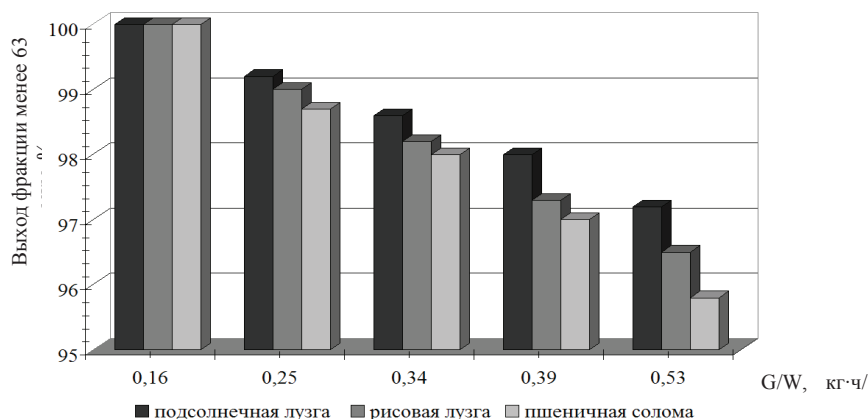


Рис. 4 – Зависимость выхода фракции менее 63 мкм от массового соотношения материала к воздуху и вида растительных отходов

На рис. 5 представлена зависимость влажности продукта измельчения растительных материалов от массового соотношения материала к воздуху. Данная зависимость показывает, что увеличение массового соотношения материала к воздуху приводит к некоторому повышению влажности продуктов, что происходит за счет увеличения общей массы влаги при увеличении количества подаваемого материала.

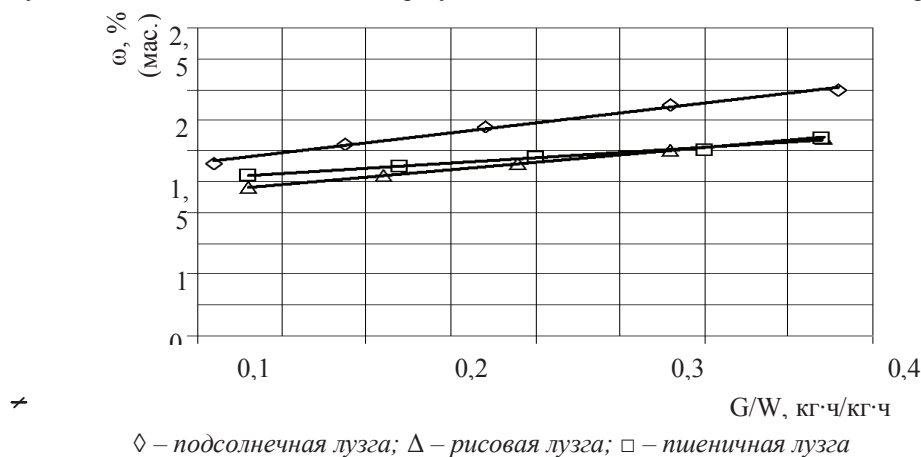


Рис. 5 – Зависимость влажности продукта измельчения растительных материалов от массового соотношения материала к воздуху и вида растительных отходов

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что при массовом соотношении материала к воздуху 0,51 – 0,53 кг·ч/кг·ч удельные энергозатраты на измельчение минимальны и составляют для подсолнечниковой лузги, пшеничной соломы и рисовой шелухи 320, 350 и 370 кВт·ч/т, соответственно.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана мельница тонкого помола растительных материалов [16].

Основываясь на результатах проведенных исследований, в конструкторском бюро «Южное» спроектирована, а на Южном машиностроительном заводе изготовлена установка тонкого измельчения растительных отходов (рис.6). Установка предназначена для тонкого измельчения таких материалов как по-

дсолнечниковая лузга, рисовая шелуха и пшеничная солома. На рис. 7 приведены исходные растительные отходы и продукты их измельчения. Технические характеристики установки приведены в табл.1.

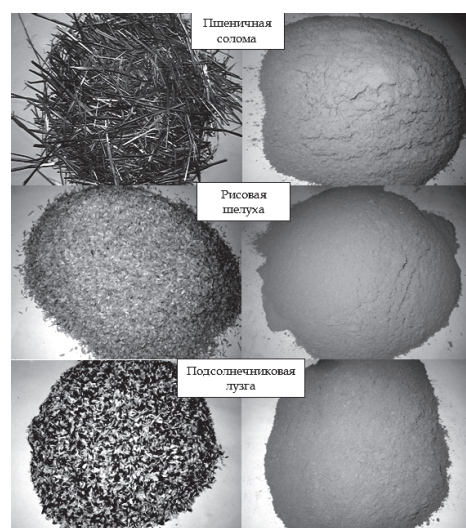
**Таблица 1 – Технические характеристики установки**

|   |               |
|---|---------------|
| Производительность, кг/ч.....                 | 300           |
| Энергозатраты, кВт•ч/т.....                   | 250-300       |
| Дисперсность продуктов помола, мкм.....       | не более 100  |
| Влажность продукта .....                      | не более 5 %. |
| Частота вращения ротора мельницы, об/мин..... | 3000          |
| Мощность электродвигателя мельницы, кВт.....  | 75            |
| Габаритные размеры установки, мм:             |               |
| - Длина.....                                  | 8080          |
| - Ширина.....                                 | 3460          |
| - Высота.....                                 | 5850          |

В компании «Bio-Fine SA» (г. Моресбург, Южная Африканская Республика) установка прошла опытно-промышленные испытания, которые показали, что производительность установки достигает 300 кг/ч, при этом получен продукт измельчения с содержанием фракции менее 100 мкм 97-100 % с влажностью до 5% при энергозатратах на измельчение до 300 кВт•ч/т.



**Рис. 6 – Установка совмещенного процесса тонкого измельчения и сушки растительных отходов**



**Рис. 7 – Исходные растительные отходы и продукты их измельчения**

#### Выводы

1. Проведение теоретических и экспериментальных исследований позволили установить зависимости влияния технологических параметров совмещенного процесса тонкого измельчения и сушки на характеристики продуктов измельчения растительных отходов.

2. На основании проведенных исследований разработана и изготовлена установка совмещенного процесса тонкого измельчения и сушки растительных отходов опытно-промышленного образца.

#### Литература

1. Шишков Н.И. Исследование совмещенных процессов измельчения и сушки в мельнице ударно-отражательного действия / Шишков Н.И., Опарин С.А., Сорока П.И., Зражевский В.И. // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції “Наука і освіта – 2002”.- Том 19.- Дніпропетровськ - Донецьк. - 2002.- С. 49-50.
2. Мирон Г.И. К вопросу об использовании подсолнечниковой лузги для кормовых целей // Масложивная промышленность. - 1987. - №1. - С.9.
3. Гуменюк Г.Д. Использование отходов промышленности и сельского хозяйства в животноводстве / Г.Д. Гуменюк, А.М. Жадан, А.Н. Коробко.- 3-е изд. перераб. и доп.- К.: Урожай, 1991. - 216 с.
4. Рекомендации по использованию подсолнечниковой лузги в кормлении сельскохозяйственных животных и птицы / Ольшанский А.В., Солоха Д.И., Мельников К.А. и др. – Днепропетровск: ДГАУ, 1998. - 20с.

5. Килятач Е.И. Наш опыт использования подсолнечниковой лузги для кормовых целей / Килятач Е.И., Чертков А.С. // Масложировая промышленность. – 1987. - № 1. – с. 8.
6. Двойнос Я.Г., Реологические и физико-механические свойства древесно-полиэтиленовой композиции / Радченко Л.Б., Сезонов В.Н., Швед Н.П. // Экотехнология и ресурсосбережение. – 1998. - №2. – С.35-38.
7. Лукасик В.А. Композиционные материалы на основе полимерных и других органических отходов / Лукасик В.А., Жирков А.Г., Анцуков Ю.А. и др. // Пластические массы. – 2000. - № 7. – с. 39-40.
8. Цывин М.М. Производство древесной муки / Цывин М.М., Котцов С.Г., Шмаков И.В. – М: Лесная промышленность. 1982 – 135 с.
9. Сорока П.И. Получение соединений кремния из отходов рисового производства / П.И. Сорока, О.А. Тертышный., Т.В. Гриднева // Наукові праці Одеської нац. академії харчов. технологій. – 2006. – Вып. 28. – Т.2. – С. 4 -10.
10. Гура Д. В. Совместное получение диоксида кремния и тепловой энергии из отходов рисового производства // Д. В. Гура, П. И. Сорока // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Технологія 2012". – 6 - 7 квітня – Ч.1. – м. Северодонецьк. – 2012 р.
11. Гура Д. В. Определение технологических параметров процесса получения кремний-углеродных композиций из отходов рисового производства методами термодинамических и кинетических исследований // Д. В. Гура, П. И. Сорока // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. – Вип. 3(42). – С. 310 – 314.
12. Пат. №88108 Україна, МПК С 01 В31/36. Спосіб одержання карбіду кремнію/Сорока П.Г., Біла А.О. та ін.; заявник та патентовласник ДВНЗ «УДХТУ».-№ а 200802934; заявл.06.03.08; опубл.10.09.09, Бюл.№ 17.
13. Пат. №78894 Україна, МПК С 01 В31/36. Спосіб одержання карбіду кремнію/ Попов О.В., Сорока П.Г.; заявник та патентовласник ДВНЗ «УДХТУ».-№ а 200506587;заявл.04.07.05;опубл.25.04.07, Бюл.№ 5. 4.
14. Усков Ю.Н., Казарновский А.М. Измельчение растительных материалов в шаровых и вибрационных мельницах // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1983. - №8. - С. 4-5.
15. С.А. Опарин, Е.В. Лещенко, П.И. Сорока Расчет технологических параметров процесса измельчения в мельнице ударно-отражательного действия / Наукові праці ОНАХТ. – 2010. - №37. – с. 118-122.
16. Пат. №96082 Україна МПК В02С13/14 Відцентровий млин ударної дії / Сорока П.Г., Опарин С.О.; заявник та патентовласник ДВНЗ «УДХТУ». - № а 2001096302 Заявл. 25.05.2010. – Опубл. - 27.12.2010. - Бюл. №18.

УДК 532.5

## ВИКОРИСТАННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ОБРОБЦІ РІДКИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ

Долінський А.А. академік НАНУ, д-р техн. наук, професор,  
Авдєєва Л.Ю. д-р техн. наук, ст. наук. сп., Жукотський Є.К. ст. наук. сп., Макаренко А.А. аспірант  
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

*Розглянуті механізми виникнення і розвитку кавітаційних явищ. Показані переваги використання кавітаційного обладнання. Наведені приклади використання різних видів кавітаційних впливів для інтенсифікації процесів обробки рідких гетерогенних систем.*

*The mechanisms of occurrence and development of cavitation are examined. Advantages of cavitation equipment are shown. The examples of the use of different types of cavitation effects in order to intensify the processing of liquid heterogeneous systems are given.*

Ключові слова: кавітація, масообмін, інтенсифікація, дискретно-імпульсне введення енергії.

### Постановка проблеми

Інтенсифікація виробничих процесів, а також вирішення проблем енерго- та ресурсозбереження в різних галузях промисловості останнім часом набуває все більш важливого значення. Одним з найбільш ефективних способів досягнення високих технологічних результатів в масообмінних і гідродинамічних процесах при обробленні рідких гетерогенних систем є імпульсні енергетичні впливи на оброблювані середовища. Наукова база процесів з такими впливами представляє собою актуальну проблему і знахо-