

21. Денисова М.Н., Митрофанов Р.Ю. // Химия и технология растительных веществ: Материалы VI Всеросс. конф., Санкт-Петербург, 14-18 июня 2010 г. – Санкт-Петербург: ООО Сборка, 2010. – С. 30-31.
22. Митрофанов Р.Ю., Денисова М.Н. // Химия и технология растительных веществ: Материалы VI Всеросс. конф., Санкт-Петербург, 14-18 июня 2010 г. – Санкт-Петербург: ООО Сборка, 2010. – С. 74-75.
23. Денисова М.Н., Митрофанов Р.Ю. // Технология и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы 3-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (28-30 апреля 2010 г., г. Бийск). – В 2-х ч. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – Ч. 1. – С. 202-207.
24. Калейне Д.А., Веверис А.Г., Полманис А.Г., Эриньш П.П. и др. // Химия древесины. – 1990. – №3. – С. 101-107.
25. Веверис А.Г., Эриньш П.П., Калейне Д.А., Полманис А.Г. и др. // Химия древесины. – 1990. – №3. – С. 89-95.
26. Ефремов А.А., Кротова И.В. // Химия растительного сырья. – 1999. - № 2. – С. 19-39.
27. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч.П. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – С. 463.
28. Яунземс В.Р., Сергеева В.Н., Можейко Л.Н. // Известия Академии наук Латвийской ССР. Серия химическая. – 1966. - № 6. – С. 729-740.
29. Жбанков Р.Г. Инфракрасные спектры и структура целлюлозы. – Минск: Наука и техника, 1972. – 254 с.
30. Прусов А.Н., Прусова С.М., Голубев А.Е. // Оборонная техника, 2009, № 4-5, С. 97-103.

## О КАВИТАЦИОННОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ТВЕРДЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.С. Иванов, М.С. Василишин

Учреждение Российской академии наук Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН)

*В статье рассматриваются условия, при которых происходит эффективное кавитационное измельчение твердых дисперсных материалов. Показано, что разрушение частиц возможно только в том случае, когда соотношение размеров кавитационного пузырька и частицы находится в определенном диапазоне.*

*Ключевые слова: кавитация, измельчение, дисперсные материалы.*

Известно, что процесс измельчения в акустическом поле протекает только при наличии кавитации [1]. Механизм воздействия кавитации на обрабатываемый материал сводится, в основном, к разрушающему воздействию кумулятивных микроструек жидкости, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков [2].

С одной стороны, кавитация является вредным и нежелательным фактором, поскольку приводит к повышенному износу оборудования и может вызвать, в конечном итоге, его поломку. С другой стороны, существует целый класс аппаратов типа роторно-пульсационных [3], коллоидных мельниц и виброкавитационных измельчителей [4], в которых кавитационный режим работы создается специально с целью интенсификации

процесса диспергирования. В связи с этим, возникает необходимость в определении границ эффективного воздействия кавитации на измельчаемые частицы с целью оптимизации энергозатрат и уменьшения кавитационного износа рабочих органов аппаратуры.

Известно, что сила воздействия кавитационного пузырька при схлопывании в значительной степени определяется расстоянием между ним и твердой поверхностью (быстро убывает при увеличении расстояния). По этой причине наибольшее разрушающее действие на материал оказывают пузырьки, находящиеся в непосредственной близости, например в порах или микротрещинах, которые имеются у всех дисперсных твердых частиц. Газ, находящийся в углублении на поверхности, представляет собой так называемый

мое ядро кавитации, т.е. область на поверхности твердой частицы, в наибольшей степени подвергшуюся динамическому воздействию. Такая модель впервые была предложена практически одновременно и независимо друг от друга Л.А. Эпштейном [5] и Е. Гарвеем [6].

При попадании твердой частицы в область с пониженным давлением (ниже давления насыщенных паров данной жидкости) газ, находящийся в микротрещине, начинает увеличиваться в объеме и превращается в микропузырек. Далее, когда частица попадает в область с повышенным давлением этот пузырек схлопывается. При коллапсе пузырька возникает кумулятивная микроструйка, проникающее действие которой подобно твердому телу, поскольку схлопывание происходит с очень большой скоростью (от десятков до сотен метров в секунду). Таким образом, кумулятивные микроструи являются основной причиной разрушения дисперсных частиц [7,8].

Известно множество методов для определения эффективности воздействия кавитации на различные материалы. Так, например, Л.Д. Розенбергом [9] предлагается использовать индекс или число кавитации:

$$K = \frac{V_n}{V}, \quad (1)$$

где  $V_n$  – суммарный объем всех кавитационных пузырьков (кавитационного облака или кластера),  $m^3$ ;  $V$  – объем жидкости, в которой эти пузырьки находятся,  $m^3$ .

Безусловно, помимо газосодержания на эффективность измельчения будут оказывать влияние и другие факторы, такие как скорость потока, шероховатость поверхности, время воздействия, температура, давление, физико-химические свойства дисперсионной среды (поверхностное натяжение, плотность, давление насыщенных паров) и т.д. Следует учитывать и воздействие на процесс измельчения самой жидкости, которая, в соответствии с эффектом П.А. Ребиндера [10], способна понижать прочность обрабатываемых частиц в том случае, если она их хорошо смачивает.

В [11] вводится понятие безразмерного критерия эрозионной активности, по которому можно судить об эффективности ультразвукового измельчения:

$$\chi = \frac{R_{MAX}^3}{R_{MIN}^3 \cdot \Delta t \cdot f}, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – время схлопывания кавитационной полости, в течение которого она успевает из-

менить свой радиус от максимального  $R_{MAX}$  до минимального  $R_{MIN}$ , с;  $f$  – частота колебаний, Гц.

Для оценки эрозионной эффективности акустической энергии Л.Д. Розенбергом [12] вводится понятие эрозионно-акустического к.п.д.:

$$\eta_{ЭП} = \frac{E_M}{E}, \quad (3)$$

где  $E_M$  – энергия, затрачиваемая непосредственно на механическое эрозионное разрушение, Дж;  $E$  – потребляемая энергия, Дж.

В работах [13] и [14] М.А. Маргулисом приводится следующая зависимость для оценки величины  $E_M$ :

$$E_M = \frac{\Delta S \cdot q_0}{2 \cdot d_T^2 \cdot N_A}, \quad (4)$$

где  $\Delta S$  – поверхность, образующаяся при кавитационном разрушении,  $m^2$ ;  $q_0$  – энергия разрыва связи (на 1 моль вещества), Дж/моль;  $d_T$  – кинетический диаметр молекулы, м;  $N_A$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>.

Следует заметить, что вышеупомянутые исследования направлены, главным образом, на анализ воздействия кавитации на макрообъекты. Для адекватной оценки эффективности воздействия кавитации на процесс измельчения дисперсных твердых тел, как правило, они непригодны.

Совершенно очевидно, что измельчение дисперсных частиц возможно только при определенных соотношениях между их размерами и размерами кавитационных пузырьков. Диаметр кавитационного пузырька в момент его схлопывания не должен превышать диаметр измельчаемой частицы, поскольку в этом случае образующаяся кумулятивная струйка не сможет быть сфокусирована на ее поверхности. Существует, по-видимому, и нижний предел этого соотношения, т.к. с уменьшением размера кавитационной полости уменьшается и выделяемая пузырьком энергия.

Поэтому, на наш взгляд было бы правильнее характеризовать эффективность воздействия на дисперсный измельчаемый материал с помощью критерия кавитационного измельчения:

$$K = \frac{d_q}{d_n}, \quad (5)$$

где  $d_q$  – диаметр измельчаемой частицы, м;  $d_n$  – диаметр пузырька, м.

Для определения энергозатрат в процессе измельчения дисперсного материала можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$\frac{i \cdot \sigma}{3 \cdot \rho_{ТВ}} \cdot (S_{уд.к} - S_{уд.н}) = \frac{\eta \cdot E}{m_{ТВ}} = \varepsilon, \quad (6)$$

где  $i$  – степень измельчения;  $\rho_{ТВ}$  – плотность измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение на межфазной границе частицы – окружающая среда, Дж/м<sup>2</sup>;  $S_{уд.н}$  и  $S_{уд.к}$  – удельные площади поверхностей частиц до и после измельчения, соответственно, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $E$  – энергия, сообщаемая измельчаемому материалу извне, Дж;  $\eta$  – к.п.д., в долях от единицы;  $m_{ТВ}$  – масса измельчаемого материала, кг;  $\varepsilon$  – удельная энергия измельчения, Дж/кг.

В данном случае под энергией, сообщаемой измельчаемому материалу извне, следует понимать суммарную энергию, создаваемую кумулятивными микроструйками:

$$E = n \cdot E_K, \quad (7)$$

где  $n$  – число пузырьков, шт.;  $E_K$  – энергия кумулятивной микроструйки, Дж.

Полагая, что энергия кумулятивной микроструйки сообщается частице за счет удара, получим:

$$E_K = \frac{m_K \cdot v_K^2}{2}, \quad (8)$$

где  $m_K$  – масса кумулятивной струйки, кг;  $v_K$  – скорость кумулятивной струйки, м/с.

$$m_K = \rho_{ж} \cdot V_K, \quad (9)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $V_K$  – объем кумулятивной струйки жидкости, м<sup>3</sup>.

Принимая форму струйки цилиндрической, найдем ее объем:

$$V_K = l_K \cdot \frac{\pi \cdot d_K^2}{4}, \quad (10)$$

где  $l_K$  – длина кумулятивной струйки, м;  $d_K$  – диаметр микроструйки, м.

Согласно [3], диаметр и длина кумулятивной струйки определяются следующими соотношениями:

$$d_K = 0,092 \cdot R_{MAX} \quad (11)$$

$$l_K = 0,116 \cdot R_{MAX}, \quad (12)$$

где  $R_{MAX}$  – максимальный радиус кавитационного пузырька (в момент схлопывания), м.

Скорость кумулятивной струйки [3]

$$v_K = k \cdot v_C, \quad (13)$$

где  $v_C$  – скорость схлопывания кавитационного пузырька, м/с;  $k$  – энергетический коэффициент.

Скорость схлопывания кавитационного пузырька [3]

$$v_C = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \left( \left( \frac{R_{MAX}}{R_O} \right)^3 - 1 \right) \cdot \frac{P}{\rho_{ж}}}, \quad (14)$$

где  $R_O$  – начальный радиус пузырька (радиус зародыша), м;  $P$  – давление, действующее на пузырек, Па.

Согласно [3], энергетический коэффициент  $k \approx 4$ .

Наибольшей трудностью при расчете является определение начального и максимального радиуса кавитационного пузырька. Согласно экспериментальным данным [3], соотношение  $R_{MAX}/R_O = 3 \div 6$ .

Примем соотношение  $R_{MAX}/R_O = 4,5$ . С использованием зависимостей (7)-(14) можно получить выражение для определения минимального значения конечного радиуса кавитационного пузырька, при котором еще будет возможно разрушение частицы:

$$R_{MAX} = 4,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{33,8 \cdot n \cdot P}}, \quad (15)$$

откуда 
$$d_{II} = 9 \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{33,8 \cdot n \cdot P}} \quad (16)$$

Практическое использование выражения (16) предполагает предварительное определение энергии, необходимой для разрушения частицы по (6), а также оценку числа кавитационных пузырьков и величины давления, при котором происходит их схлопывание.

Сравнивая расчетное значение  $R_O$  с фактическим, определенным, например, исходя из размера пор частицы, можно сделать выводы о возможности ее разрушения.

В итоге условие, при котором будет происходить гарантированное разрушение дисперсной частицы, выглядит следующим образом:

$$1 < K < \frac{d_q}{9 \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{33,8 \cdot n \cdot P}}} \quad (17)$$

## ВЫВОДЫ

Для эффективного измельчения дисперсных твердых материалов необходимо, чтобы соотношение размеров измельчаемой частицы и кавитационного пузырька находилось в определенном диапазоне значений, границы которого задаются условием (17).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. – М.: Химия, 1983. – 192 с., ил.
2. Майер В.В. Кумулятивный эффект в простых опытах. – М.: Наука, 1989. – 192 с.
3. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.
4. Акунов В.И. Технология тонкого и сверхтонкого измельчения. – М.: Уч. изд. лит., 1959. – 124 с.
5. Эпштейн Л.А. // Журнал Технической Физики, 1946. – Т. 16. – № 6. – С.695–702.

6. Harvey E.N., Barnes D.K., Mc Elory W.D. et al. //Journal of the American Chemical Society, 1945. – Vol. 67. – P. 156.
7. Козырев С.П. // Доклады АН СССР, 1966. – Т. 170. – № 1. – С. 61–63.
8. Козырев С.П. // Доклады АН СССР, 1968. – Т. 183. – № 3. – С. 568–571.
9. Розенберг Л.Д. Мощные ультразвуковые поля. – М.: Наука, 1968. – 266 с.
10. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
11. Новицкий Б.Г., Фридман В.М. Стадии раскалывания частиц под действием ударных волн. – Ультразвуковая техника: сборник статей. – М., 1964. – № 5. – С. 52–60.
12. Розенберг Л.Д. // Акустический журнал, 1965. – Т. 11. – № 1. – С. 121.
13. Маргулис М.А. // Акустический журнал, 1976. – Т.22. – № 2. – С. 261–265.
14. Маргулис М.А. // Акустический журнал, 1976. – Т.22. – № 4. – С. 558–557.

## ПРЕДОБРАБОТКА МИСКАНТУСА КИТАЙСКОГО В УСЛОВИЯХ ГИДРОТЕРМОБАРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА В НЕЙТРАЛЬНОЙ СРЕДЕ

С.Н. Цуканов, В.В. Будаева

Учреждение Российской академии наук Институт проблем химико-энергетических технологий  
Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН)

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований по предобработке мискантуса китайского методом гидротермобарического взрыва. Выявлены закономерности изменения состава полученных жидкой и твердой фаз от условий эксперимента (давление, температура, продолжительность выдержки, модуль).*

*Ключевые слова: недревесное растительное сырье, мискантус китайский, лигнин, целлюлоза, гидротермобарический взрыв, давление, температура.*

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что различные виды предобработки растительного сырья, позволяют облегчить выполнение задачи по разделению на условно чистые компоненты, а также повысить способность холоцеллюлозы к ферментативному гидролизу. Наиболее перспективным видом предобработки различных видов целлюлозосодержащего сырья является гидротермобарический взрыв, вследствие дешевизны и высокой эффективности, экологичности [1].

Кроме того, этот метод позволяет существенно увеличить степень извлечения биологически активных веществ из некоторых

видов растительного сырья и отходов их переработки [2].

Наибольший интерес в качестве объекта исследования вызывает мискантус китайский (Веерник китайский *Miscanthus sinensis* - Anders). В Институте цитологии и генетики СО РАН в результате популяционно-генетических и селекционных исследований была выделена новая форма мискантуса китайского, которая в течение 20 лет ежегодно (начиная с третьего года) дает до 15 т/га сухой биомассы. Кроме того, эта форма показала хорошую морозоустойчивость в условиях Западной Сибири [3].

Целью настоящей работы является исследование влияния условий гидротермоба-