

УДК 658.51:(547.992:631.878)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ КАВИТАЦИОННОЙ ДИСПЕРГАЦИИ ТОРФА



**ИЗМАЙЛОВ А.Ю.,**  
академик РАН,



**СОРОКИН К.Н.,**  
соискатель

Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация, e-mail: 7623998@mail.ru

*Технологии производства гуминовых удобрений, основанные на щелочной экстракции гуминовых веществ из торфа с последующим их экстрагированием и очисткой, широко известны. Но в последнее десятилетие активно применяют акустическую кавитацию для интенсификации процессов кристаллизации, диффузии, экстракции. Рассмотрели технологические процессы работы ультразвукового генератора и кавитационного диспергатора. Определили их технические различия при воздействии на твердые частицы двухкомпонентных смесей. Уточнили теоретические определения ультразвуковой и гидродинамической экстракции. Рассмотрели механизм экстрагирования и его математическое уравнение. Выявили особенности гидродинамического режима экстрагирования целевых компонентов из пористых материалов, каким является торф. Определили, что наибольшее влияние на скорость процесса диффузии оказывают вихревое экстрагирование, экстрагирование в режиме вакуумного кипения и взрывного вскипания экстрагента, механические колебания суспензии, пульсация давления. Показали необходимость усовершенствования теории диффузионно-конвективного экстрагирования путем ввода в математические расчеты дополнительных коэффициентов, учитывающих влияние повышения температуры суспензии торфа в процессе кавитации и активации жидкого компонента суспензии на эффективность диффузионно-конвективного процесса. Отметили, что необходимо также ввести коэффициент активации жидкости в процессе кавитационной обработки суспензии торфа. В основу математического расчета данного коэффициента может быть положена разность показателей рН до и после активации. Предложили научную гипотезу экстракции гуминовых веществ из торфа, которая использована при разработке оборудования и технологического процесса по производству гуминовых удобрений на основе кавитации.*

**Ключевые слова:** торф, ультразвуковая и гидродинамическая кавитация, диффузионно-конвективный механизм, гуминовые удобрения, экстракция, кавитационный диспергатор.

**П**рименение современного высокотехнологичного оборудования для осуществления кавитационных процессов при переработке суспензии торфа стало научно обоснованным шагом к получению высококачественных гуминовых удобрений [1]. В сельском хозяйстве повышается интерес к органо-минеральным удобрениям с целью получения экологически чистого сельскохозяйственного сырья и продукта.

Технологии производства гуминовых удобре-

ний, основанные на щелочной экстракции гуминовых веществ из торфа с последующим их экстрагированием и очисткой, широко известны. Но в последнее десятилетие активно применяют акустическую кавитацию для интенсификации процессов кристаллизации, диффузии, экстракции.

Ультразвуковое диспергирование – это тонкое размельчение твердых веществ или жидкостей, то есть переход веществ в дисперсное состояние с образованием золя под действием ультразвуковых ко-

лебаний.

Однако, как показали исследования, затраты энергии на получение полей кавитационных пузырьков в ультразвуковых излучателях на порядок выше, чем в гидродинамических кавитационных аппаратах. Это связано с быстрым затуханием ультразвуковых колебаний в жидкостях и, особенно, в пузырьковых смесях и суспензиях. В связи с этим для кавитационной обработки жидких сред более перспективны гидродинамические аппараты, в которых кавитация возникает при взаимодействии потоков жидкости между собой или с рабочими органами кавитаторов. Затраты энергии при этом в 10-15 раз меньше, чем при использовании ультразвука [2, 3].

Кавитация представляет собой средство перехода локальной концентрации энергии низкой плотности в энергию высокой плотности, связанную с пульсацией и захлопыванием кавитационных пузырьков (каверн). В момент схлопывания кавитационной каверны давление и температура локально могут достигнуть значительных величин (по расчетным данным, до 100 МПа и до 10000 К соответственно) [4-6]. Данное определение кавитации характерно как для ультразвуковой, так и для гидродинамической экстракции.

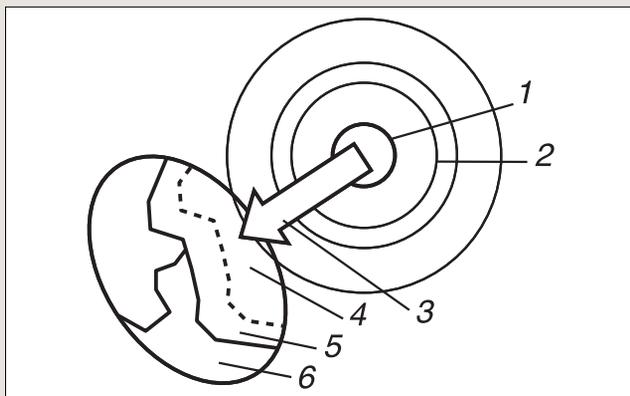


Рис. 1. Разрушающее действие кавитации на частичку торфа:

1 – схлопывающийся кавитационный пузырь; 2 – ударная волна; 3 – кумулятивная струйка; 4 – разрушенный слой частички торфа; 5 – углубленный диффузный слой; 6 – размельченный слой частички торфа

В резонансных гидродинамических генераторах используется возбуждение колебаний резонирующих элементов в виде пластин, стержней или мембран набегающей струей жидкости [4-7]. Колебания резонирующих элементов создают акустическое поле излучателя. Наиболее распространенная модификация – пластинчатые излучатели с консольным креплением вибрирующей пластины. Струя, вытекающая с большой скоростью из конус-

но-цилиндрического или шелевого сопла, попадает на пластину с клиновидным концом. При этом происходит срыв струи, и возникают вихревые пульсации и кавитация.

Схематическое изображение действия кавитационных пузырьков на частицы торфа представлено на *рисунке 1*.

За счет кинетической энергии жидкости кумулятивные струйки разрушают поверхностные слои жидкости и поверхность частичек торфа. Мелкие частицы твердого тела, размеры которых соизмеримы с поперечным сечением кумулятивных струй, увлекаются ими и создают дополнительные усилия, ускоряющие процесс разрушения твердых частиц торфа, находящихся в жидкости.

**Цель исследований** – совершенствование теоретических основ кавитационной диспергации суспензии торфа.

**Материалы и методы.** Существует несколько методов экстрагирования материалов: механический, ультразвуковой, гидродинамический и др. В процессе гидродинамического кавитационного диспергирования происходят измельчение суспензии торфа, диффузия, растворение гуминовых веществ и их вымывание в раствор. Все они происходят одновременно, взаимно влияют друг на друга и составляют суть процесса экстракции.

Экстракция – частный случай процессов массообмена, в которых имеет место переход массы вещества из одной среды в другую. Это сложный процесс, объединяющий несколько более простых [6-10]. При экстракции осуществляется переход вещества из сырья (отдающая среда) в экстрагент (воспринимающая среда).

Важным процессом, обеспечивающим извлечение веществ из сырья, является диффузия – постепенное взаимное проникновение веществ, граничащих друг с другом. Она основана на выравнивании концентрации вещества в отдающей и воспринимающей средах. Движущей силой диффузии служит разность концентраций. При выравнивании концентраций процесс приостанавливается. Различают конвективную диффузию, свободную и внутреннюю.

При конвективной диффузии перенос вещества осуществляется не отдельными молекулами, а объемами его раствора. Конвективная диффузия происходит в результате перемещения экстрагента относительно сырья, а скорость ее выражается следующим уравнением:

$$\frac{dM}{d\tau} = -\beta \cdot F \cdot \frac{dc}{dx},$$

где  $\frac{dM}{d\tau}$  – скорость диффузии, определяемая массой

вещества,  $M$ , перешедшей из одной среды в другую за единицу времени  $\tau$ ,  $\varphi$ ;

$\beta$  – коэффициент конвективной диффузии;

$F$  – площадь контакта отдающей и воспринимающей сред;

$dc$  – разность концентраций вещества в средах;

$dx$  – изменение толщины диффузионного слоя.

Коэффициент конвективной диффузии показывает количество вещества, переходящего через  $1 \text{ м}^2$  поверхности контакта в воспринимающую среду (экстрагент) в течение 1 с при разности концентраций, равной 1.

Скорость конвективной диффузии значительно выше молекулярной. Молекулярную и конвективную диффузии можно отнести к свободной диффузии, если между отдающей и воспринимающей средами нет перегородки.

Процесс экстрагирования в целом может быть выражен следующим математическим уравнением:

$$S = K \cdot F \cdot dc \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $S$  – количество извлеченного вещества;

$K$  – коэффициент массопередачи;

$F$  – поверхность контакта сред;

$dc$  – разность концентраций;

$\tau$  – время экстракции.

Коэффициент массопередачи объединяет все виды диффузии:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{D_b} + \frac{1}{\beta} + \frac{\sigma}{D_c}}, \quad (2)$$

где  $D_b$  – коэффициент внутренней диффузии;

$\sigma$  – толщина диффузионного слоя, в котором происходит молекулярная диффузия;

$D_c$  – коэффициент молекулярной диффузии.

В зависимости от метода экстракции значение коэффициента различно. При высокой скорости движения экстрагента значение второго и третьего слагаемых может быть минимальным или даже равным 0 в связи с тем, что существенно увеличивается коэффициент конвективной диффузии и, соответственно, уменьшается диффузионный слой.

Однако при любом методе экстракции внутренняя диффузия имеет место, и коэффициент  $K$  влияет на нее.

Наибольшее влияние на скорость интенсификации процесса диффузии оказывают вихревое экстрагирование, экстрагирование в режиме вакуумного кипения и взрывного вскипания экстрагента, применение механических колебаний суспензии, пульсаций давления.

В целом механизм экстрагирования в условиях интенсивного гидродинамического воздействия на пористые частицы торфа можно рассматривать как

диффузионно-конвективный.

По мнению ряда исследователей [4-8], теория диффузионно-конвективного экстрагирования еще не разработана полностью. Поэтому исследования в данной области остаются актуальными. Следует оговориться, что для значительной части экспериментальных данных до сих пор не удалось предложить адекватные математические модели. В этих случаях дается только качественное объяснение наблюдаемых эффектов. Данная теория нуждается в совершенствовании, в частности – путем ввода в математические расчеты дополнительных коэффициентов, учитывающих влияние повышения температуры суспензии торфа в процессе кавитации и активации жидкого компонента суспензии на эффективность диффузионно-конвективного процесса.

**Результаты и обсуждение.** На основе экспериментальных исследований нами установлено, что начальная температура суспензии торфа в реакторе  $18^\circ\text{C}$  в процессе ее кавитации в течение 30 мин повысилась до  $31,4^\circ\text{C}$ . Таким образом, расчетный вариант этого коэффициента  $K_1$  должен определяться исходя из разницы температуры суспензии торфа в кавитаторе и начальной – в реакторе экстракции. Выделяющаяся в процессе схлопывания каверн энергия положительно влияет на возбуждение ионизации и диссоциации молекул суспензии торфа в реакторе экстракции.

По мнению ряда исследователей, кавитационная обработка воды, присутствующей в суспензии торфа, изменяет ее физико-химические свойства, увеличивает  $pH$  воды, способствует ее активации [2, 4, 6]. В результате кавитационного воздействия вода временно становится активным растворителем труднорастворимых веществ без введения химических реагентов. Поэтому, по нашему мнению, необходимо также ввести коэффициент активации жидкости  $K_2$  в процессе кавитационной обработки суспензии торфа. В основу математического расчета данного коэффициента может быть положена разность показателей  $pH$  до и после активации.

Таким образом, уравнение процесса экстрагирования может быть дополнено коэффициентами  $K_1$  (учитывающим влияние температуры на диспергацию суспензии торфа в процессе кавитации) и  $K_2$ , (учитывающим активацию жидкости в суспензии торфа также непосредственно в процессе кавитации). В итоге оно примет следующий вид:

$$S = K \cdot F \cdot dc \cdot \tau \cdot K_1 \cdot K_2. \quad (3)$$

Эти теоретические положения подтверждены результатами экспериментальных исследований (табл., рис. 2, 3).

Таблица			
ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И КИСЛОТНОСТИ СУСПЕНЗИИ ТОРФА ОТ ВРЕМЕНИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИ СООТНОШЕНИИ ТОРФА И ВОДЫ 1:3			
Время, мин	В реакторе экстракции	В зоне кавитации	pH
0	18,0	20,8	-
5	20,8	25,2	4,44
10	22,7	32,5	4,44
15	25,8	36,1	4,45
20	28,4	42,8	4,45
30	31,4	44,5	-

В результате анализа развития теории диффузионно-конвективного экстрагирования, основанной на гидродинамическом воздействии на материал, определили данное направление как вариант нового научного подхода, и оно нуждается в дальнейшем развитии и совершенствовании.

### Выводы

1. Установлено, что теория кавитационной диспергации и экстракции нуждается в дальнейшем развитии и совершенствовании. Необходимо ввести в математические модели расчетов процессов экстракции следующие дополнительные коэффициенты:

- коэффициент, влияющий на ускорение процесса диспергации суспензии торфа вследствие повышения температуры в кавитаторе;
- коэффициент активации жидкости в суспензии

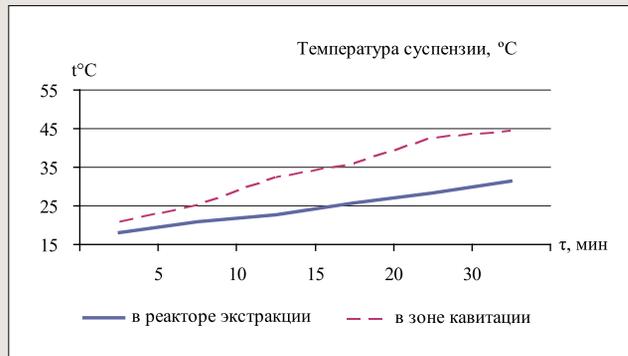


Рис. 2. Зависимость температуры суспензии торфа от продолжительности процесса кавитации

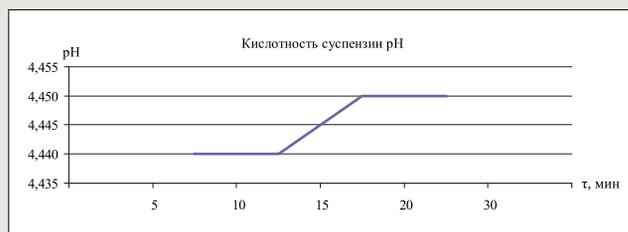


Рис. 3. Зависимость уровня кислотности гуминовых удобрений от времени воздействия кавитации на суспензию торфа

торфа в процессе кавитации.

2. Предложена научная гипотеза экстракции гуминовых веществ из торфа, которая использована при разработке оборудования и технологического процесса по производству гуминовых удобрений на основе кавитации.

### Литература

1. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. – № 4. – С. 8-12.

2. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТПГУ. – 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 861-869.

3. Скворцов Л.С., Варшавский В.Я., Дубровин А.В., Сердюк Б.П. Кавитационный генератор для селективной дезинтеграции минерального сырья // [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ntds.ru/statyi/028\\_kavitatsionnaya\\_melnitsa.pdf](http://www.ntds.ru/statyi/028_kavitatsionnaya_melnitsa.pdf) (Дата обращения 17.08.2015).

4. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 668 с.

5. Промтов М.А. Кавитация // [Электронный

ресурс]. Режим доступа: [www.tstu.ru/r.php&r=-structure.kafedra&sort=&id=3](http://www.tstu.ru/r.php&r=-structure.kafedra&sort=&id=3) (Дата обращения 17.08.2015).

6. Балабьико А.М., Зимин А.И., Ружицкий В.П. Гидродинамическое диспергирование. – М.: Наука, 1998. – 330 с.

7. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. – М.: Химия, 1990. – 208 с.

8. Бабенко Ю.И., Иванов Е.В. Экстрагирование. Теория и практические приложения. – СПб.: Профессинал, 2009. – 336 с.

9. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование (система твердое тело – жидкость). – Л.: Химия, 1974. – 256 с.

10. Витенько Т.Н., Гумницкий Я.М. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду // Химия и технология воды. – 2007. – Т. 29, № 5. – С. 422-432.

## IMPROVEMENT OF ELEMENTS OF THE THEORY OF PEAT CAVITATION DISPERSION

**A.Yu.Izmaylov, K.N.Sorokin**

All-Russia Research Institute of Mechanization for Agriculture, 1st Institutskiy proezd, Moscow, 109428, Russian Federation, e-mail: 7623998@mail.ru

*Humic fertilizers production technologies based on alkaline extraction of humic substances from peat with the subsequent their extraction and cleaning are widely known. Acoustic cavitation to an intensification of processes of crystallization, diffusion, extraction was actively applied in recent 10 years. Technological processes of operation of the ultrasonic generator and a cavitation dispersator are considered. Technical distinctions between them at impact on firm particles of two-component mixes are defined. Theoretical definitions of ultrasonic and hydrodynamic extraction were specified. Mechanism of extraction and its mathematical equation are considered. Features of the hydrodynamic mode of extraction of target components from porous materials what peat is are revealed. It is defined that vortex extraction, extraction in the mode of vacuum boiling and explosive boiling up of an extraction agent, application of mechanical oscillations of suspension, pressure pulsations have the greatest impact on speed of an intensification of diffusion process. It is necessary to improve the diffusive and convective extraction theory by input in mathematical calculations of the additional coefficients considering increase influence of peat suspension temperature in the course of cavitation and activation of a liquid component of suspension on efficiency of diffusive and convective process. It is noted that it is also necessary to enter coefficient of activation of liquid during cavitation processing of peat suspension. A difference of pH indicators before and after activation can be a basis for mathematical calculation of this coefficient. A scientific hypothesis of extraction of humic substances from peat which is used when development of an equipment and technological process for humic fertilizers production on a basis of cavitation was suggested.*

**Keywords:** Peat; Ultrasonic and hydrodynamic cavitation; Diffusive and convective mechanism; Humic fertilizers; extraction; Cavitation dispersator.

### References

1. Izmaylov A. Yu., Lobachevskiy Ya. P., Sizov O. A. *Perspektivnye puti primeneniya energo- i ekologicheskikh effektivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv [Long-term ways of using energy and environmentally efficient machine technologies and techniques]. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2013. No. 4. pp. 8-11 (Russian).*
2. Promtov M. A. *Perspektivy primeneniya kavitatsionnykh tekhnologiy dlya intensivatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Prospects of application of cavitation technologies for a chemical and technological processes intensification]. Vestnik TPGU. 2008. T. 14. No. 4. pp. 861-869 (Russian).*
3. Skvortsov L. S., Varshavskiy V. Ya., Dubrovin A. V., Serdyuk B. P. *Kavitatsionnyy generator dlya selektivnoy dezintegratsii mineral'nogo syr'ya [Cavitation generator for selective disintegration of mineral raw materials]. Retrieved August 17.2015 from [http://www.ntds.ru/statyi/028\\_kavitatsionnaya\\_melnitsa.pdf](http://www.ntds.ru/statyi/028_kavitatsionnaya_melnitsa.pdf) (Russian).*
4. Knepp R., Deyli Dzh., Khemmit F. *Kavitatsiya [Cavitation]. Moscow: Mir, 1974. 668 pp.*
5. Promtov M. A. *Kavitatsiya [Cavitation]. Retrieved August 17.2015 from <http://www.tstu.ru/r.php&r=structure.kafedra&sort=&id=3> (Russian).*
6. Balabysheko A. M., Zimin A. I., Ruzhitskiy V. P. *Gidrodinamicheskoe dispergirovanie [Hydrodynamic dispersing]. Moscow: Nauka, 1998. 330 pp. (Russian).*
7. Kardashev G. A. *Fizicheskie metody intensivatsii protsessov khimicheskoy tekhnologii [Physical methods of an intensification chemical technology processes]. Moscow: Khimiya, 1990. 208 pp. (Russian).*
8. Babenko Yu. I., Ivanov E. V. *Ekstragirovanie. Teoriya i prakticheskie prilozheniya [Extraction. Theory and practical applications]. S-Petersburg.: Professional, 2009. 336 pp. (Russian).*
9. Aksel'rud G. A., Lysyanskiy V. M. *Ekstragirovanie (sistema tverdoe telo – zhidkost') [Extraction (system a solid body – liquid)]. Leningrad: Khimiya, 1974. 256 pp. (Russian).*
10. Viten'ko T. N., Gumnitskiy Ya. M. *Mekhanizm aktiviruyushchego deystviya gidrodinamicheskoy kavitatsii na vodu [Mechanism of the activating action of hydrodynamic cavitation on water]. Khimiya i tekhnologiya vody. 2007. T. 29. No. 5. pp. 422-432 (Russian).*