

**ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТИ И  
КИНЕТИКА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ  
БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ  
Часть 1. Ударные волны и кавитация**

**Ю.Н. Кудимов, В.Т. Казуб, Е.В. Голов**

*Кафедра физики и математики,  
Пятигорская государственная фармацевтическая академия*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** кавитация в начальной стадии разряда; кинетика экстракционного процесса; микросекундный фронт импульса; наносекундный фронт импульса, парогазовая полость; растительное сырье; электрический импульсный разряд в жидкости.

**Аннотация:** Экспериментально и теоретически изучены роль ударных волн и кавитации, возбуждаемых в начальной стадии каналом электрического разряда, в воздействии на частицы растительного сырья в водных суспензиях. Показано, что эти явления, сопровождающие электрический разряд, инициируемый импульсом высокого напряжения с наносекундным фронтом, обуславливают дезинтеграцию растительного материала и определяют интенсивность процессов массопереноса при экстрагировании.

**Обозначения и аббревиатуры**

$h_1$ – расстояние, на котором растягивающие усилия вызывают кавитацию;	КИН – косоугольный импульс напряжения;
$P_o$ – атмосферное давление;	МЭП – межэлектродный промежуток,
$W_0$ – энергия единичного импульса;	ПГП – парогазовая полость;
$P_0^*$ – давление на фронте падающей волны;	ПИНФ – прямоугольный импульс с наносекундным фронтом;
$P_{mo}$ – давление на фронте отраженной волны;	УВ – ударная волна;
БАС – биологически активное соединение;	ЭИР – электрический импульсный разряд.

Главной проблемой предприятий, осуществляющих переработку лекарственного растительного сырья, является низкая эффективность традиционных методов, зачастую использующих токсичные растворители для извлечения целевых компонентов [1], поэтому технология интенсивного извлечения биологически активных соединений (БАС) является одним из приоритетных направлений научно-технического развития как в нашей стране, так и за рубежом. Об этом свидетельствует большое количество научных и прикладных разработок [2-7]. Перспективы данного направления тем более значимы, что в ряде случаев удается создать комплексный технологический процесс, имеющий более низкую энергоемкость и более глубокое извлечение продуктов, в том числе и из отходов традиционных технологий [8].

В настоящее время для интенсификации процесса массопереноса используют воздействие на сырье различных силовых полей: ультразвуковых [9], электрических [10], импульсных [11], дискретно-импульсных [5]. Очевидно, что поиск методов интенсификации процесса экстрагирования ведется в направлениях воздействия на клеточные структуры с целью увеличения их диффузионной активности. Однако большинство этих

перспективных методов зачастую находятся на стадии исследований или лабораторных (полупромышленных) испытаний, что указывает на ряд сложных нерешенных теоретических и практических вопросов.

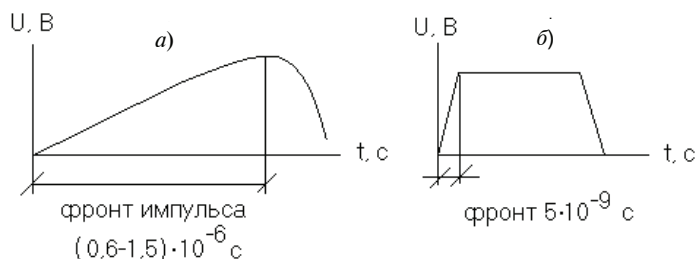
Применение для интенсификации процессов экстрагирования «электрогидравлического удара» [12], основанного на электрическом импульсном разряде (ЭИР) в жидкости, инициируемого косоугольным импульсом напряжения (КИИ) с фронтом 0,5-1,5 мкс (рис. 1, а) позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели экстрагирования (степень извлечения, время обработки и т.д.).

Основным действующим фактором при электрогидравлическом разрушении твердых материалов, размещенных в жидкости, принято считать ударную волну [12], сформированную в этих средах или в жидкости в результате их электрического импульсного пробоя. Поэтому основная масса работ в области электроразрядных технологий посвящена исследованию канала разряда, как источника гидродинамических возмущений, процессам распространения ударных волн и волн сжатия в жидкостях [13].

Стремление усилить воздействие ударной волны от одиночного разряда за счет увеличения его энергии с целью интенсификации экстракционного процесса, заимствованное из электрогидравлических технологий, где ударная волна является основным действующим фактором, приводит к усилению эрозии электродов, что загрязняет получаемые экстракты металлическими примесями [14].

К тому же при инициировании разряда косоугольными импульсами напряжения в начальной стадии развития разряда за счет токов растекания, обусловленных низким удельным сопротивлением и электрической емкостью межэлектродного промежутка (МЭП) в воде, используемой в качестве экстрагента, возможен значительный нагрев суспензии, вызывающий деструкцию извлекаемых биологически активных соединений [15]. Негативное действие предразрядных токов будет усиливаться по мере насыщения экстрагента извлекаемыми веществами, сопровождаться бурным газообразованием [16], приводящим к окислению целевого препарата, и, как следствие, уменьшению его активности.

Снизить действие ряда негативных факторов, характерных для теплового механизма разряда в микросекундном диапазоне времени, можно путем значительного увеличения крутизны импульса и изменения его формы, т.е. применением прямоугольных импульсов напряжения с наносекундным фронтом (ПИИФ) (рис. 1, б).



**Рис. 1** Осциллограммы импульсов напряжения:

- а) косоугольного импульса напряжения;
- б) прямоугольного импульса напряжения

Это позволит избежать интенсивного нагрева суспензии за счет сведения до минимума токов утечки, снизить напряжение пробоя МЭП до уровня напряжения зажигания разряда, и, как следствие, сократить энергоемкость процесса с одновременным уменьшением эрозии электродов.

Для разработки электроразрядных экстракционных аппаратов (рис. 2), позволяющих реализовать преимущества процессов водного извлечения с применением ПИИФ и решающих проблемы ресурсосбережения и экологии, необходимо создание научных основ интенсификации технологического процесса. Необходимо изучить

круг вопросов, включающих в себя обоснование параметров импульсов напряжения, инициирующих разряд в жидкости и выявить основные факторы, влияющие на кинетику и способствующие интенсификации экстракционного процесса.

Если применительно к механическим способам интенсификации химических технологических процессов известно достаточное количество работ, методик расчета и моделей, позволяющих конструировать аппараты, прогнозировать выход экстрактивных веществ и время их извлечения [3, 7, 17-21], то для электрогидравлического способа экстракции такая информация представлена ограниченным числом разработок [22-23].

Существующая техническая возможность регулировать параметры разрядного контура в широком диапазоне, делает импульсный разряд достаточно универсальным рабочим инструментом, воздействующим на обрабатываемое сырье, позволяющим осуществлять дискретный подвод энергии непосредственно к обрабатываемому объекту.

При прохождении фронта волны давления в отдельном кусочке вещества возникают большие разнонаправленные ускорения соседних элементов вещества и на их границах появляются напряжения растяжения и сдвига, превышающие предел прочности. Мелкие частицы под действием такой волны могут перемещаться и демпфировать ударное воздействие, но в то же время при размерах частиц меньше ширины фронта давления эти силы сжимают ее почти равномерно со всех сторон (условие квазистатики). В таких условиях частицы разрушить трудно.

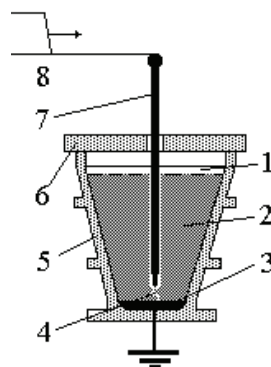
С другой стороны, короткий импульс давления будет охватывать узкую зону, и в момент прохождения фронта волны через сечение крупной частицы волна не затронет весь объем частицы и фронт разрушения будет отставать от волны давления. Это приведет к непрерывному уменьшению давления и остановке фронта разрушения. Качественно такие же процессы будут происходить и при воздействии на упруго-пластичный материал, которым является растительное сырье.

Сырье, применяемое для экстрагирования, как правило, имеет размеры 3÷10 мм, поэтому для интенсификации технологического процесса, раскрытия пор и нарушения целостности клетки, содержащей наибольшее количество биологически активных компонентов, длительность фронта ударной волны должна быть меньше характерного размера частички.

Следующая за фазой сжатия ударной или акустической волны фаза разрежения генерирует явления, связанные с разрывом жидкой среды, причем эти процессы охватывают почти весь объем. В работах по использованию электрического разряда в жидкости [15, 24] упоминается, что электрогидравлический эффект сопровождается кавитационными явлениями. Однако в значительной мере эти данные не подтверждены экспериментально и носят характер интуитивных предположений.

Некоторые более подробные обсуждения кавитационных явлений при электрогидравлической технологии изложены в [25, 26]. В первой рассматривается появление и развитие сплошного кавитационного разрыва, возникающего у движущейся (деформируемой) металлической поверхности, а во второй – кавитационные явления при схлопывании парогазовой полости.

Таким образом, для выяснения физического механизма измельчения и интенсивного экстрагирования сырья в случае использования электрического разряда необходимо экспериментально подтвердить, по крайней мере, наличие объемной кавитации, сопровождающей электрический разряд, определить условия, для которых она наиболее интенсивна.



**Рис. 2** Схема электроразрядного аппарата:

- 1 – жидкость;
- 2 – обрабатываемый материал;
- 3 – заземленный электрод;
- 4 – канал электрического разряда;
- 5 – корпус камеры; 6 – крышка;
- 7 – высоковольтный электрод;
- 8 – импульс напряжения

Гидродинамические характеристики ударных и акустических волн в жидкости не зависят от способа их получения [27], поэтому для анализа кавитационных процессов использован подход, разработанный для взрывчатых химических веществ в воде [28], но с учетом энергетического вклада, характерного для электрического пробоя воды [12, 13].

Кавитационные процессы при электрическом пробое воды могут возникать в зоне разрежения за фронтом ударной волны, при отражении волны от раздела вода-воздух (свободная поверхность), отражении от акустически жестких поверхностей (стенки и дно камеры), а также при схлопывании парогазовой полости (ППГ), в которую вырождается канал разряда в завершающей стадии. Оценим роль этих процессов в объеме жидкости.

Для анализа кавитационных процессов использовали следующий подход [28]: давление на фронте ударной волны (**УВ**)

$$P_m(r, t) = 0,06 \cdot \left[ \frac{P_\Phi}{(r_i)^2} \right] \cdot e^{-\frac{(T-t)}{\theta_0} \cdot \sigma(T-t)}, \quad (1)$$

где  $P_\Phi$  – максимальное давление в канале разряда;  $r_i$  – нормированный текущий радиус  $r_i = r/l$ ;  $r$  – текущий радиус;  $l$  – длина рабочего промежутка;

$$\sigma(T-t) = \begin{cases} 1 & T \leq t_i, \\ \theta_0 & T > t_i, \end{cases}$$

где  $\sigma(T-t)$  – единичная разрывная функция, определяющая скачок давления на фронте волны;  $T = r_i/a_0$  – время подхода фронта УВ к точке  $r_i$ ;  $t_i$  – текущее время.

Скорость распространения фронта УВ

$$a_0 = \left[ \frac{P_m}{P_0(1 - \frac{\rho_0}{\rho_\Phi})} \right]^{\frac{1}{2}},$$

где  $\rho_0$  – плотность воды;  $\rho_\Phi$  – плотность воды в области сжатия;  $\theta_0$  – характерное время спада давления в точке  $r_i$ , определяемое по эмпирической формуле [29]

$$\theta_0 = W_0^{\frac{1}{3}} \left[ LC \left( \frac{\ln r_i \cdot k}{l_\Phi - 0,5} \right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

где  $W_0$  – энергия единичного импульса;  $L$  – индуктивность разрядного контура;  $C$  – разрядная емкость;  $k \approx 6,6 \cdot 10^9$  Па.

Полное время спада положительной фазы давления волны  $P_m^*$  от  $P_m$  до нуля рассчитывали по выражению

$$\theta_{m^+}^* = k_1 \cdot \theta_0, \quad (2)$$

где  $k_1 = f(LC)$  и в исследуемом диапазоне  $k_1 = 1,5 \div 3$ .

Полное время существования зоны разрежения, наступающее после прохождения фазы сжатия, оценивали как

$$\theta = k_2 \cdot \theta_{m^+}^*, \quad (3)$$

где  $k_2 = f(LC) = 2,0 \div 6,0$  при  $5 \text{ мкГ} < L < 600 \text{ мкГ}$ ;  $0,01 \text{ мкФ} < C < 0,6 \text{ мкФ}$ .

Максимальную амплитуду растяжения жидкости  $P_{m0}$  рассчитывали из равенства импульса давления в положительной и отрицательной фазах:

$$P_m^* \cdot e^{-\frac{t}{\theta_0}} \cdot dt = P_{m0+} \sin(\omega t) dt,$$

где  $\omega = 2\pi/\theta_0$ .

Тогда

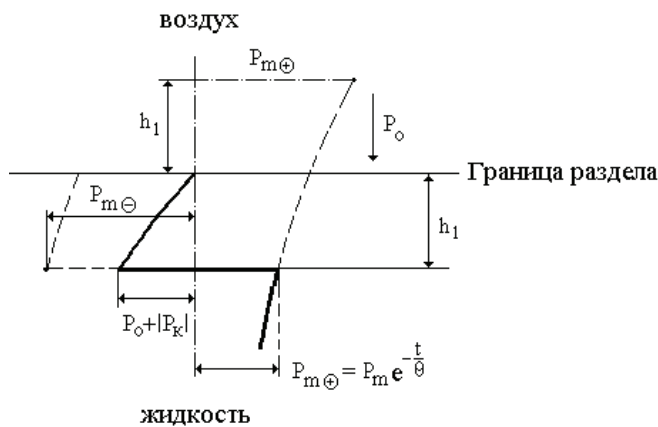
$$P_{m0} = 2\pi P_m^* \theta_0 \left[ \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_1}{\theta_0}\right)}}{t_2} \right], \quad (4)$$

где  $t_1 = \theta_{m+}^*/2$ ;  $t_2 = \theta_0/2$ .

Представленные выражения позволяют оценить изменение давления в положительной и отрицательной фазах ударной волны, время существования фаз сжатия и растяжения, как функции расстояния по оси, нормальной к расположению рабочего промежутка. Для упрощения анализа рассматривали плоскую волну.

При подходе фронта УВ к свободной поверхности, учитывая, что акустическая жесткость воздуха на несколько порядков ниже акустической жесткости воды, ударная волна отразится с обратным знаком, сохраняя амплитуду, т.е.  $P_{m+}^* = -P_{m0}$ .

Схематично, с учетом зеркального отображения, характер изменения давления в жидкости при отражении фронта УВ от свободной поверхности показан на рис. 3.



**Рис. 3 Эпюра давлений при отражении фронта УВ от границы раздела:**

$P_0$  – атмосферное давление;  $P_m^*$  – давление на фронте падающей волны;

$P_{m0}$  – давление на фронте отраженной волны;  $P_k$  – значение кавитационной прочности воды;  $h_1$  – расстояние, на котором растягивающие усилия вызывают кавитацию

При достижении растягивающих давлений больше  $|P_k + P_0|$  образуется кавитационный слой на расстоянии  $h_1$  от свободной поверхности (рис. 1). Это расстояние можно определить согласно [28] в виде:

$$h_1 = -a_0 \cdot \theta_0 \cdot \ln \left[ \frac{1 - \Phi \left( \frac{|P_k| + P_0}{P_{m0}} \right)}{2} \right]. \quad (5)$$

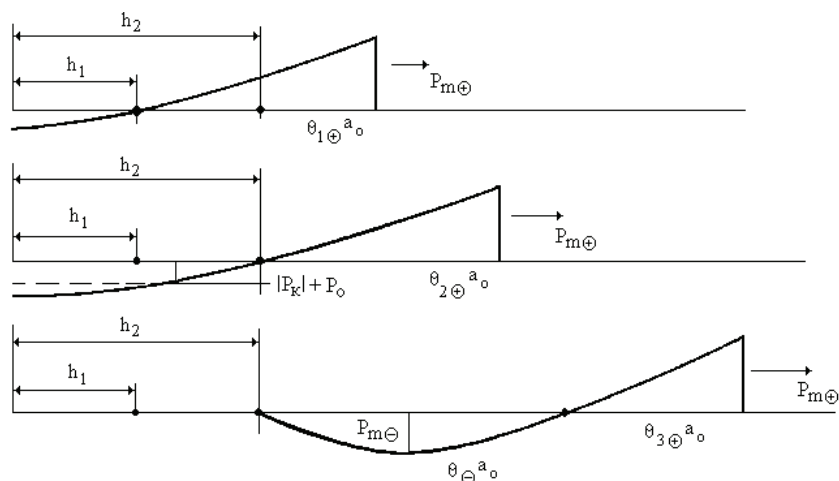
При этом давление на фронте отраженной волны срезается до значений  $|P_k| + P_o$ , а в образовавшемся кавитационном слое давление имеет значения, близкие к давлению насыщенных паров, т.е. близкие к нулю.

Для завершающей части фазы сжатия волны этот слой будет играть роль новой свободной поверхности, поэтому произойдет отражение этой части волны от первого кавитационного слоя и может образоваться новый слой кавитации. При этом отраженная волна дробится на несколько волн с амплитудой, не превышающей  $|P_k| < P_o$ , которые распространяются между слоями кавитации.

Представляется возможным оценить расстояние  $h_1$  при  $P_m \approx (2 \div 4) \cdot 10^6$  Па,  $\theta_o \approx 10^{-7}$  с,  $P_k \sim P_o = 10^5$  Па,  $a_o \approx 1,5 \cdot 10^3$  м/с. Тогда из выражения (5)  $h_1 \approx 10$  мм.

Таким образом, согласно представленному механизму, отражение волны от границы вода-воздух генерируют кавитационные процессы только вблизи поверхности, захватывая незначительный объем воды.

Фронт ударной волны, отражаясь от абсолютно жесткой поверхности (дно камеры или ее стенки) с тем же знаком, что и падающая волна, увеличивает амплитуду примерно в 2 раза. Распространяясь обратно от границы раздела, отраженная волна достигает зоны разрежения, сформированной за положительной фазой прямой волны, отражается с обратным знаком, создавая растягивающие усилия на участке между твердой поверхностью и зоной кавитации от прямой волны. Следовательно, при двойном отражении падающей волны, зона кавитации также ограничена объемом вблизи твердой поверхности и не захватывает основной объем камеры. Из этого следует, что основные кавитационные процессы, захватывающие весь объем камеры, связаны с зоной разрежения, следующей за положительной фазой прямой ударной волны. На схеме (рис. 4) показано движение ударной волны и зоны разрежения, по которой можно оценить время начала и окончания кавитационных процессов в объеме жидкости для конкретных точек пространства, например, на участке  $h_2-h_1$ .



**Рис. 4** Диаграмма движения волны в жидкости:

$P_o$  – атмосферное давление;  $P_m^*$  и  $P_{m0}$  – давление на фронте падающей и отраженной волн,  $P_k$  - значение кавитационной прочности воды,  $h_1$  - расстояние, на котором растягивающие усилия вызывают кавитацию

Так, время начала  $t_{н.к}$  и конца  $t_{к.к}$  кавитационных явлений можно оценить из выражений:

$$t_{н.к} = \theta_{1\oplus} + h_1/a_o, \quad t_{к.к} = \theta_{1\ominus} + \theta_{3\oplus} + h_2/a_o. \quad (6)$$

Длительность процесса кавитации на участке  $h_2-h_1$

$$\Delta t_k = t_{к.к} - t_{н.к}. \quad (7)$$

Полученные выражения проверены экспериментально при использовании скоростной кинокамеры СФР-2М.

В работе использовался генератор, позволяющий получать прямоугольные импульсы напряжения с фронтом  $5 \cdot 10^{-9}$  с и энергией до 200 Дж. Камера для изучения кавитационных явлений, со встроенными окнами из специального сорта стекла размером  $225 \text{ мм}^2$ , изготовлена из полиэтилена. Рассматриваемое оптическое поле отстояло от оси расположения электродов на 10 мм. Расстояния от электродов до дна камеры и верхнего уровня жидкости были одинаковы и равны 80 мм.

В экспериментах оценивалось время начала и завершения кавитационных процессов, размер и количество кавитационных пузырьков в оптическом поле.

Расчет времени начала и конца кавитации определялся с момента подхода волны разрежения к точке  $h_1$  и подхода к точке  $h_2$  конца волны разрежения. Совпадение расчетных и экспериментальных значений удовлетворительное, что подтверждает правоту рассматриваемых теоретических моделей процесса образования кавитации при электрическом пробое воды (табл. 1). С уменьшением фронта импульса напряжения уменьшаются характерные времена существования зон сжатия и растяжения ударной волны и, соответственно, уменьшается время существования кавитации в объеме жидкости.

Таблица 1

Форма импульса	Параметры импульса		Начало кавитации $t_{н.к} \cdot 10^{-6}$ , с		Конец кавитации $t_{к.к} \cdot 10^{-6}$ , с		Длительность кавитации $\Delta t_k \cdot 10^{-6}$ , с	
	$W_0$ , Дж	Фронт $\tau_\phi$	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт
КИН	200	$0,6 \cdot 10^{-6}$ , с	29,5	32,0	130,0	104,0	100,5	72,0
ПИНФ	200	$5 \cdot 10^{-9}$ , с	12,3	10,4	87,4	78,0	75,1	67,6

По длительности воздействия растягивающих усилий в фиксируемой фоторазверткой зоне можно оценить максимальный размер кавитационного пузырька [27, 28]:

$$R_{\max} \approx \sqrt{\frac{2P_{m0}}{3\rho_0}} \cdot \Delta t_0, \text{ где } P_{m0} \approx 2P_0.$$

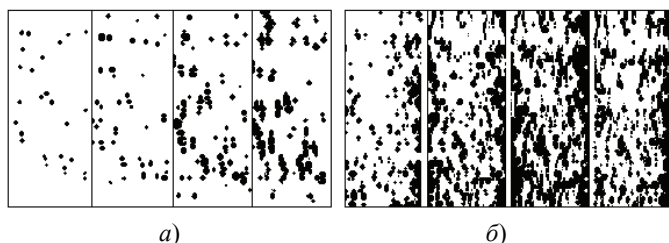


Рис. 5 Фоторазвертки кавитационных процессов при воздействии импульсов различной формы: а) косоугольный импульс; б) прямоугольный

При воздействии ПИНФ  $R_{\max} \approx 0,5$  мм, а при КИН  $R_{\max} \approx 0,8$  мм, экспериментальные значения  $R_{\max}$  составляют 0,4 и 0,75 мм соответственно, однако основная масса пузырьков в 1,5-2 раза меньше  $R_{\max}$ .

Количество образующихся пузырьков в фиксируемой на фоторазвертке зоне при воздействии КИН (рис. 5, а) значительно меньше, чем при быстром вводе энергии (воздействие ПИНФ) (рис. 5, б).



При быстром вводе энергии, в связи с малыми размерами пузырьков и их высокой концентрацией, происходит их взаимодействие, т.е. образуются ансамбли из нескольких пузырьков, аналогично явлениям при ультразвуковом и гидромеханическом воздействии на воду [7, 30, 31].

Увеличение количества пузырьков при быстром вводе энергии в канал разряда можно объяснить высокой степенью активации начальных зародышей размером  $10^4 \div 10^5$  м при больших кратковременных перепадах сжимающих и растягивающих усилий в наблюдаемой зоне.

Таким образом, концентрация кавитационных пузырьков в объеме жидкости зависит от скорости ввода энергии и составляет  $\sim 10^3$  см<sup>-3</sup> при использовании ПИНФ и  $\sim 2 \cdot 10^2$  см<sup>-3</sup> при использовании КИН.

Каждый пузырек при схлопывании генерирует кратковременный импульс давления, который можно рассчитать по показателю газосодержания  $\delta$  из выражения [32]

$$\delta = R_{\min}/3R_{\max},$$

где  $R_{\min}$  – исходный размер зародыша,  $R_{\max}$  – средний максимальный размер пузырька. В нашем случае, принимая размер активируемого зародыша при быстром вводе энергии  $10^5$  м, а при медленном –  $10^4$  м, получим  $\delta_1 \approx 0,016$ ,  $\delta_2 \approx 0,1$ .

Тогда максимальное давление вблизи пузырька [32]

$$P_m = 10^5/81\delta^3. \quad (9)$$

Для  $\delta_1$  значение  $P_m \approx 3 \cdot 10^8$  Па, для  $\delta_2$  значение  $P \approx 1,2 \cdot 10^6$  Па. Длительность пиков давления, соответствующая воздействию ПИНФ, не превышает 1 мкс, что обеспечивает длительность фазы сжатия в волне менее 1 мм. Воздействие этих волн может эффективно дезинтегрировать частицы размером менее 1 мм. При многозарядном воздействии эти процессы будут повторяться от разряда к разряду, создавая условия для измельчения сырья, включая усталостные нагрузки.

Так, при электроразрядном экстрагировании из сырья БАС под воздействием ПИНФ происходит более равномерное измельчение частичек сырья всех исходных размеров, но наиболее интенсивно измельчаются частицы фракций +1-0,5 (табл. 2).

При воздействии КИН измельчению больше подвержены частицы фракций -5+3, измельчение остальных фракций незначительно и осуществляется, очевидно, за счет кавитационных процессов на начальной стадии разряда.

Таблица 2

**Изменение размеров частиц в процессе экстрагирования**

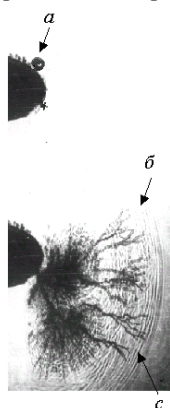
Гранулометрический состав исходного сырья, мм	Содержание в сырье до экстрагирования, %	Содержание в сырье после экстрагирования, %	
		ПИНФ	КИН
- 5	74,90	21,10	32,42
+ 4	13,03	20,05	31,80
+ 3	6,45	20,85	29,21
+ 1	3,87	18,20	4,32
+ 0,5	1,29	12,30	1,74
- 0,5	0,43	7,50	0,51
–	100	100	100



Разработанная экспериментальная аппаратура с использованием ОКГ и многокадровых систем позволила получить уникальные теньевые фотографии начальной стадии формирования разряда при пробое с использованием ПИНФ (рис. 6). При воздействии первых импульсов напряжения область оптической неоднородности вблизи острейшего электрода излучает свечение, которое может отождествляться с ионизацией газа. С каждым следующим импульсом его появление происходит позже, за счет выравнивания электрического поля вблизи высоковольтного электрода из-за локального удаления микроострий на аноде и связано с локальным вскипанием жидкости в этих точках (рис. 6, а). Образование кавитационных пузырьков происходит уже на начальной стадии формирования электрического разряда, практически с момента его зажигания, и является результатом взаимодействия ударных волн (рис. 6, с) инициируемых высокоскоростными стримерными образованиями (рис. 6, б).

Газовые образования продуктов распада незавершенных стримерных каналов в воде достаточно устойчивы и имеют тенденцию к увеличению объема путем их объединения (рис. 7, б).

Если исключить из электроразрядного экстракционного процесса проявление кавитации на начальной стадии разряда применением камеры с мембраной (рис. 8), то при воздействии КИН измельчение частичек размером +1 не происходит, что подтверждает ранее сделанный вывод о влиянии фронта ударной волны на измельчение сырья только определенной крупности.



**Рис. 6 Теньевые фотографии начальной стадии формирования**

**разряда при пробое воды ПИНФ:**

*а* – газовые образования на поверхности электрода;

*б* – нитевидная структура стримерных каналов;

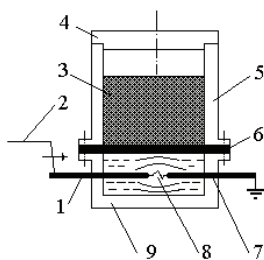
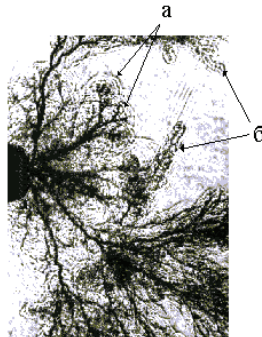
*с* – ударные волны, формируемые развивающимися стримерными каналами

(Радиус острия 150 мкм, первый кадр через 50 нс после приложения напряжения, 2-й кадр через 150 нс, ×50)

**Рис. 7 Теньевая фотография ударных волн вокруг стримерных каналов**  
(через 50 нс после кадра 2, рис. 5 б, с):

*а* – зарождение кавитационных пузырьков;

*б* – кавитационные ансамбли, ×50



**Рис. 8 Схема мембранного электроразрядного аппарата:**

*1* – высоковольтный электрод;

*2* – импульс напряжения; *3* – обрабатываемый материал;

*4* – крышка; *5* – корпус камеры; *6* – мембрана;

*7* – заземленный электрод (катод);

*8* – канал электрического разряда;

*9* – корпус разрядной камеры

Таким образом, образование кавитационных пузырьков происходит на начальной стадии формирования электрического разряда, практически с момента его зажигания и является результатом взаимодействия ударных волн, инициируемых высокоскоростными стримерными образованиями, а затем в зоне разрежения за фронтом ударной волны при схлопывании ППП, в которую вырождается канал разряда в завершающей стадии. Эти явления оказывают определяющее действие на измельчение растительного сырья и создают высокую турбулентность движения жидкости в рабочей камере, что служит как источником измельчения твердой фазы, так и активатором диффузионных процессов при экстрагировании из клетки и межклеточного пространства растительного сырья.

#### *Список литературы*

1. Муравьев И.А. Технология лекарств. Т. 1, М.: Медицина, 1980. - 391 с.
2. Бутиков В.В., Вишняков В.В. Интенсификация процессов в массообменном оборудовании химических производств наложением электрических полей // Электронная обработка материалов. – 1983. - № 4 (112). - С. 30-32.
3. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химических технологий. М.: Химия, 1990. - 208 с.
4. Юсунбеков Н.Р., Нуритдинов Ш., Абрамов Б.Б., Зупаров У.Х. Интенсификация массообменных процессов в системе твердое тело-жидкость с использованием электрогидравлического эффекта // Электронная обработка материалов, 1987. № 3 (135). - С. 66-67.
5. Долинский А.А. Принцип дискретно-импульсного ввода энергии и его применение в технологических процессах // Вестник АН УССР. - 1984. - № 1. - С. 39-46.
6. Белоглазов И.Н., Муравьев А.И. Интенсификация и повышение эффективности химико-технологических процессов. - М.: Химия, 1988. – 615 с.
7. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. – М.: Медицина, 1983. - 160 с.
8. Степанян В.П. Интенсификация процесса экстракции биологически активных соединений из растительного сырья электрическими импульсными разрядами // Автореф. дисс... канд. техн. наук. - Тамбов: ТГТУ, 2000. - 16 с.
9. Debska W., Walasiar A., Wltradziewiki w naukach Farmaceutycznych // Herba polon. - 1975.- № 2.- S.220 - 228.
10. Ботошан Н.И., Папченко А.Я., Берзой С.Е. Интенсификация процесса экстракции сахара предварительной электрообработкой свекловичной стружки // Электронная обработка материалов. – 1990. - № 8. - С. 66-73.
11. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. - Л.: Наука, 1995, 277 с.
12. Барская А.В. Исследование диспергирования растительного сырья и экстракции водорастворимых веществ с использованием электрических разрядов // Автореф. дисс... канд. техн. наук. - Томск: ТПУ, 1998. 19 с.
13. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. - М.: Наука, 1971. - 190 с.
14. Казуб В.Т., Кудимов Ю.Н., Степанян В.П. Исследование эрозии электродов при электроимпульсной экстракции пектинов и алкалоидов // Регион. конф. по фармакологии и фармации. - Пятигорск, 1996. - С. 46.
15. Бойко В.Д., Мизиненко И.В. Экстракция растительного сырья с применением электрического разряда в жидкости // Хим.- фарм. журнал. - №2. - 1968. - С. 60-63.
16. Курец В.И., Лобанова Г.Л., Филатов Г.П. О газообразных продуктах и взаимодействии их с минералами при электроимпульсном измельчении руд // Электронная обработка материалов. – 1985. - № 4. - С. 48-50.
17. Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело-жидкость. Львов: Изд-во Львовского университета, 1970.- 186 с.

18. Романков П.Г. Курочкина М.Н. Процессы и аппараты химической промышленности. - Л.: Химия, 1984. - 232 с.
19. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. М.: Химия, 1974. - 312 с.
20. Циборовский Я. Основы процессов химической технологии. - Л.: Химия, 1967. - 719 с.
21. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1995. - 367 с.
22. Применение электрогидравлического эффекта в технологических процессах производства // Под редакцией А.П. Сорочинского. - Киев: Наукова Думка, 1970. Вып. IV, С. 108.
23. Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий, - Киев, 1990. - 208 с.
24. Чубыкин М.М. Оценка дробящего действия импульсной нагрузки // Науч. тр. Иркутского НИИ редких и цветных металлов. - Иркутск, 1970. - Вып. 20. - С. 23-25.
25. Чачин В.Н., Шадуя В.Л. Некоторые особенности деформирования плоских заготовок при электрическом взрыве проводников в замкнутых камерах малого объема // - В кн.: Импульсные методы обработки материалов. - Минск: Наука и техника, 1977. - С. 44-45.
26. Теляшов Л.Л., Охотин В.А., Половин А.Т. Экспериментальные исследования стадии схлопывания парогазовой полости в воде // Электронная обработка материалов. - 1982. - № 4. - С. 118-124.
27. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. - М.: Физматгиз, 1966. - 482 с.
28. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. - Л.: Госсудиздат, 1961. - 313 с.
29. Физические основы электрического взрыва // Под редакцией Г.А. Гулого. - Киев, 1983. - 136 с.
30. Агранат Б.А., Башкиров В.И. Критерий оценки интенсивности ультразвуковой кавитации // ДАН СССР. - 1968. - Т. 179, № 4. - С. 821-824.
31. Мощные ультразвуковые поля // Под редакцией Л.Д. Розенберга - М.: Наука, 1968. - 267 с.

---

**Electric Discharge Processes in Liquid and Extract Kinetics  
of Biologically Active Components  
Part I. Shock Waves and Cavitation**

**Yu.N. Kudimov, V.T. Kazub, E.V. Golov**

*Department of Physics and Mathematics, Pyatigorsk State Pharmaceuticals Academy*

**Key words and phrases:** cavitation in the initial stage of discharge; extract process kinetics; microsecond impulse front; nanosecond impulse front; vapour gaseous space; vegetation raw materials; electric impulse discharge in liquid.

**Abstract:** The role of shock waves and cavitation, caused by initial stage of electric discharge under the influence of vegetation raw materials particles in liquid suspension is examined theoretically and experimentally. It is shown that these phenomena following electric discharge initiated by high voltage impulse with nanosecond front cause the disintegration of raw material and determine the intensity of mass transfer process under the extraction process.

## **Elektroentladende Prozesse in der Flüssigkeit und die Kinetik des Extrahierens der biologischaktiven Komponenten**

**Zusammenfassung:** Es ist die Rolle der am Anfangsstadium von der Kanelle der elektrischen Entladung erregenden Stoßwelle und Kavitation in der Wirkung auf die Teilchen des Pflanzenrohstoffes in der Wassersuspension experimentell und theoretisch untersucht. Es ist gezeigt, daß diese Erscheinungen, die die mit dem Impuls der Hochspannung mit dem nanosekunden Front iniziirenden elektrischen Entladung begleiten, beeinflussen die Desintegration des Pflanzenrohstoffes und bestimmen die Intensivität der Prozesse der Massenübertragung bei der Extragierung.

---

## **Processus des charges électriques dans le liquide et cinétique d'absorption des composants bio-actifs**

**Résumé:** On a étudié expérimentalement et théoriquement le rôle des ondes de choc et de cavitation, qui sont excitées dans le stade initial par le canal de la charge électrique, dans leur action sur les particules de la matière première d'origine végétale aux suspensions aqueuses. On a montré que ces phénomènes qui accompagnent la charge électrique initiée par une impulsion de la haute tension avec un front de nanoseconde, mènent à la désintégration de la matière végétale et déterminent l'intensité des processus du transfert de masse avec l'absorption.

---