

533.6.011

# МОДЕЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОВИБРОИМПУЛЬСНОМ ДИСПЕРГАТОРЕ

Д. А. ФЕДИН, Б. В. ВИНОГРАДОВ

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Получено 19.05.2010

Разработана и реализована численная методика расчета динамики движения механической системы электрогидроимпульсного аппарата с дополнительной помольной камерой совместно с разрядной полостью. Результаты расчетов использованы для определения рационального диапазона изменения параметров механической системы.

Розроблено та реалізовано методіку чисельного розрахунку динаміки руху механічної системи електрогідроімпульсного апарату з додатковою помольною камерою сумісно з розрядною порожниною. Результати чисельних розрахунків використано для визначення раціонального діапазону змін параметрів механічної системи.

The numerical technic of computation, wich describes the mechanical system dynamics at electric discharge apparatus with an added grinding cell simultaneously with discharge cavity, is created and realised. The results of computation are used for definition of parameters variation efficient range.

## ВВЕДЕНИЕ

Дополнительное измельчение порошковых материалов с помощью помольных тел, приводимых в движение за счет энергии пульсаций разрядной полости, является перспективным способом снижения удельных энергозатрат при электрогидроимпульсном (ЭГИ) диспергировании. По некоторым оценкам на пульсации полости расходуется до 50 процентов всей выделившейся в канале разряда энергии [1]. Рациональная конструкция разрядной камеры с помольными телами позволяет преобразовать часть теряемой энергии в механическую работу. Совместное диспергирование в жидкости при воздействии ударных волн и высокоскоростных струй, а также механическое измельчение в контейнере с помольными телами позволяет в несколько раз повысить производительность ЭГИ измельчения, совместить стадию тонкого и сверхтонкого измельчения [2]. Однако степень преобразования энергии в механическую работу по перемещению контейнера и далее в работу деформации твердых частиц зависит от режима выделения энергии в канале разряда и динамических параметров механической системы. Поэтому для выбора рациональных параметров механической системы ЭГИ диспергатора необходима адекватная математическая модель высоковольтного импульсного электрического разряда в жидкости (ВИЭР).

## 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ

В современной литературе имеется небольшое количество работ, посвященных математическому моделированию динамики системы "жидкость–подвижная граница" при ВИЭР, что объясняется сложностью происходящих процессов.

В работе [2] представлена эквивалентная схема механической системы камеры с контейнером и помольными телами (рис. 1).

В данной схеме масса контейнера  $m$  соединена с приведенной массой помольных тел и измель-

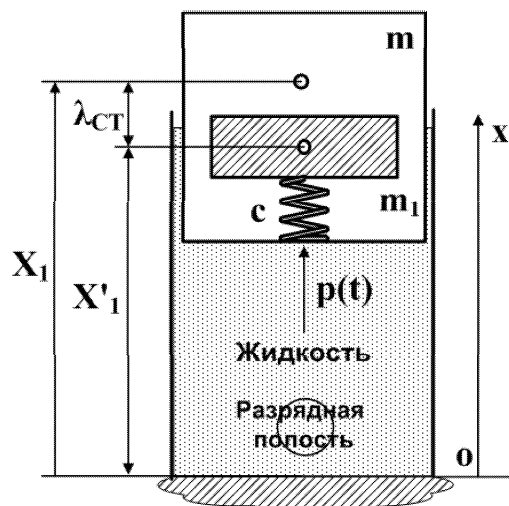


Рис. 1. Эквивалентная динамическая схема механической системы разрядной камеры

чаемого материала  $m_1$  посредством упругой связи приведенной жесткостью  $c$ , которая моделирует механические свойства материала. При ВИЭР возникает гидродинамическая сила  $P(t)$ , вызывающая перемещение контейнера и помольных тел. Общее решение дифференциального уравнения движения массы  $m_1$  позволяет описать механизм разрушения материала и определить параметры системы, способствующие разрушению. В частности, показано, что относительное перемещение массы  $m_1$  определяет величину деформации материала под действием сил инерции. Силовое воздействие увеличивается с увеличением массы помольных тел, времени действия гидродинамической силы, жесткости материала и с уменьшением массы контейнера [2].

Однако подход, развитый в работе [2], не позволяет учесть зависимость величины импульса гидродинамической силы от режима ВИЭР. Такой подход не позволяет определить параметры разряда, влияющие на процессы в контейнере, дать количественную оценку и описать эффекты, связанные с нелинейностью процессов, происходящих при ВИЭР. Процессы, происходящие при ВИЭР, существенно нелинейны [3]. Поэтому решение поставленной задачи возможно только с применением численных методов гидродинамики. В работах [3–8] представлены результаты математического моделирования гидродинамических процессов в камере с подвижной границей и упругой связью. Показана взаимозависимость динамики границы и импульса силы, действующего на границу. В работах [6, 7] численно решена смешанная задача гидродинамики ВИЭР и деформации мембраны. Уравнения идеальной сжимаемой жидкости решены совместно с граничными условиями в виде уравнения деформации листовой заготовки. В работе [7] решена задача взаимодействия волны сжатия с упругой преградой в виде слоистой пластины и элементов жесткости в виде стержневых деформируемых стержней численными методами нелинейной акустики.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математические модели, представленные в работах [2–7], сложны, не универсальны и не могут быть применены для описания динамики системы, приведенной на рис. 1. Поэтому в настоящей работе представлена математическая модель ВИЭР в разрядной камере с подвижной границей и упругой связью в акустическом приближении, позволяющая совместно рассматривать гидродинамические процессы в камере и механические процессы в

помольной камере.

Рассмотрим сферическую разрядную полость, совершающую пульсации в идеальной несжимаемой жидкости. Модель процесса можно представить как расширение сферического поршня в ограниченном объеме жидкости. Тогда для давления  $p$  и скорости  $u$  в точке пространства  $x$  справедливы уравнение движения [8]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial r} (x^2 u) = 0, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости. Если принять, что движение безвихревое и ввести потенциал скорости  $\varphi$  таким образом, что  $u = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ , то совместное интегрирование уравнений (1), (2) дает уравнение пульсаций сферической разрядной полости аналогично тому, как это сделано в работе [1]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho_0} (p_\infty - p_x) = 0, \quad (3)$$

где  $R(t)$  – радиус разрядной полости;  $\rho_0$  – плотность жидкости при нормальных условиях;  $p_x, p_\infty$  – давление в полости и на бесконечном удалении от полости соответственно.

Уравнение (3) представляет собой уравнение пульсаций сферической разрядной полости в жидкости. Поверхность полости является границей раздела "плазма-жидкость", движущейся вследствие разницы давлений внутри полости и в жидкости. К движению поверхности полости побуждает повышенное давление внутри полости  $p_x$ . Быстротечность процесса выделения энергии позволяет считать, что давление в полости изменяется по адиабатическому закону для большей части периода пульсации полости. Тогда выделявшаяся в канале мощность расходуется на повышение внутренней энергии полости и на работу расширения. Уравнение баланса энергии разрядной полости в дифференциальной форме принимает вид

$$p_x \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1} \frac{dp_x V}{dt} = N(t), \quad (4)$$

где  $V$  – объем разрядной полости;  $\gamma$  – постоянная адиабаты для содержимого полости;  $N(t)$  – функция, описывающая закон ввода мощности в канал разряда.

Адиабатическое расширение полости в ограниченном объеме разрядной камеры приводит к

сжатую заключенной в нем жидкости. Жидкость можно представить упругой сплошной средой с модулем упругости  $E$ , значение которого составляет  $2.0 \cdot 10^9$  Па при давлениях до 200 МПа. Тогда связь между объемом жидкости и давлением в ней может быть выражена следующим образом:

$$\frac{1}{E} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp_x}. \quad (5)$$

С учетом (5) уравнение (3) перепишем в виде

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho_0} \left( p_0 - E \ln \left( \frac{V_K - V}{V_K - V^0} \right) - p_r \right) = 0, \quad (6)$$

где  $V_K$  – объем разрядной камеры;  $V^0$  – начальный объем разрядной полости.

Систему уравнений, описывающую динамику механической системы разрядной камеры с контейнером и помольными телами, представим как в работе [2]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c(x - x_1) = -mg - c\lambda_{CT} + P(t), \\ m_1\ddot{x}_1 - c(x - x_1) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $m, m_1$  – масса контейнера и приведенная масса помольных тел вместе с измельчаемым материалом;  $x, x_1$  – абсолютное перемещение контейнера и помольных тел;  $c$  – приведенная жесткость материала и присоединенных тел;  $\lambda_{CT}$  – перемещение упругой связи под действием силы  $m_1 g$  ( $c\lambda_{CT} = m_1 g$ );  $P(t)$  – импульс силы, действующей на контейнер со стороны жидкости.

Решение уравнения (6) совместно с уравнением (4) и системой (7) позволяет вычислить величину давления внутри разрядной полости, скорость поверхности, радиус, давление в объеме жидкости, силу, действующую на дно контейнера, все характеристики движения масс системы и деформацию упругой связи в зависимости от времени при известном законе ввода мощности. Для решения системы численными методами необходимо задать начальные значения основных гидродинамических параметров полости.

Начальный радиус разрядной полости является функцией энергии разряда и свойств жидкости [5]:

$$R_0 = \left( \frac{3W}{4\pi p_c c_v t_{pl}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (8)$$

где  $R_0$  – начальный радиус разрядной полости;  $W$  – энергия разряда, затраченная на нагрев содержимого полости (50 процентов энергии, выделившейся в канале разряда);  $p_c$  – критическое давление пара;  $c_v$  – теплоемкость жидкости;  $t_{pl}$  – температура плазмы.

Начальное давление в полости определяется из выражения [5]

$$p_0 = p_c \left( 4 \frac{t_{pl}}{t_c} - 3 \right), \quad (9)$$

где  $t_c$  – критическая температура пара жидкости. Начальная скорость поверхности полости принимается достаточно малой  $U_0 = 0.01$  м/с<sup>2</sup>. Начальные координаты контейнера и сосредоточенной массы  $x = x_{K0}, x_1 = x_{T0}$ .

Для ВИЭР закон ввода мощности можно задать функцией [1]

$$N(t) = \begin{cases} \frac{4t}{\tau^2} E & \text{если } 0 \leq t \leq 0.5\tau, \\ \frac{(\tau-t)}{\tau^2} E & \text{если } 0.5\tau \leq t \leq \tau, \\ 0 & \text{если } \tau < t, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\tau$  – время активной стадии разряда, сопровождающейся выделением электрической энергии;  $E$  – энергия, выделившаяся в разрядной полости, определяемая из соотношения

$$E = \eta \frac{U^2 C}{2}. \quad (11)$$

Здесь  $\eta$  – коэффициент, учитывающий неполноту выделения энергии за время  $\tau$  и потери энергии на излучение волн сжатия на начальной стадии расширения разрядной полости, когда скорость сравнима со скоростью звука в жидкости;  $U$  – напряжение заряда конденсаторов;  $C$  – емкость конденсаторов. По разным оценкам суммарные потери энергии составляют от 30 до 50 процентов выделившейся энергии. Время, в течение которого происходит выделение энергии, с достаточной точностью рассчитывается по выражению

$$\tau = \pi \sqrt{LC}, \quad (12)$$

где  $L$  – индуктивность цепи разрядного контура.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 представлены результаты математического моделирования динамики контейнера с помольными телами совместно с разрядной полостью. Расчеты проведены для следующих параметров: масса контейнера  $m=1$  кг; приведенная масса помольных тел и материала  $m_1=0.5$  кг; показатель адиабаты для газа  $\gamma=1.25$ ; плотность невозмущенной жидкости  $\rho_0 = 1.0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; гидростатическое давление в жидкости  $p_{st}=1.0 \cdot 10^5$  Па; критическая плотность пара  $\rho_c = 307$  кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость воды  $c_v=1530$  Дж/К; температура плазмы  $t_{pl}=15.0 \cdot 10^3$  К; критическое давление  $p_c=2.2 \cdot$

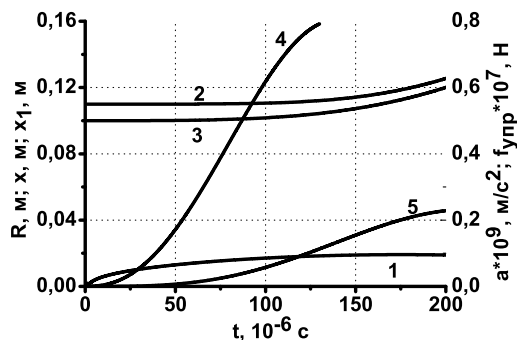


Рис. 2. Результаты моделирования динамики контейнера с помольными телами совместно с разрядной полостью:

1 – радиус разрядной полости, 2 – координата приведенной массы помольных тел и материала, 3 – координата контейнера, 4 – ускорение контейнера, 5 – сила упругости, возникающая в эквивалентной жесткости

$10^7$  Па; критическая температура  $t_c=374$  К; емкость конденсаторов  $C=2.0$  мкФ; индуктивность  $L=1.0 \cdot 10^{-6}$  Гн; напряжение разряда  $U=40.0 \cdot 10^3$  В; объем разрядной камеры  $V=1$  л; искровая постоянная  $A_{искр}=1.0 \cdot 10^5$   $B^2 \cdot c \cdot m^{-2}$ ; длина межэлектродного промежутка  $l = 2.0 \cdot 10^{-2}$  м.

Из рис. 2 видно, что расширение разрядной полости (линия 1) в ограниченном объеме жидкости приводит к движению контейнера с помольными телами и материалом (линии 2,3). Максимальное значение величины гидродинамической силы в рассматриваемом диапазоне времени составило  $1.4 \cdot 10^4$  кН. Движение контейнера начинается практически сразу после возникновения полости, однако вследствие действия сил инерции становится заметным к половине периода пульсации полости. При этом ускорения движения очень велики, максимальное значение ускорения контейнера составило  $0.8 \cdot 10^9$  м/с<sup>2</sup> (линия 4), что на несколько порядков выше, чем в современных механических вибротельницах. Движение контейнера по инерции вызывает сжатие упругой связи и движение приведенной массы  $m_1$  (линия 2). Максимальное значение величины упругой силы составило  $0.22 \cdot 10^4$  кН (линия 5). Силы инерции, возникающие при высоких ускорениях движения масс, определяют динамику механической системы, что подтверждает основные выводы, сделанные в работе [2]. Эквивалентная жесткость упругой связи, моделирующей поведение измельчаемого материала при сжатии, есть константа материала и принята равной  $5.0 \cdot 10^2$  кН/мм. Как показано в работах [3, 4, 9], величина импульса, действующего на контейнер, определяется энергией разряда, ко-

торая, в свою очередь, растет с увеличением емкости конденсаторной батареи и напряжения разряда по закону (8). Ниже приведены результаты расчета величины усилия, возникающего в упругой связи в зависимости от напряжения разряда (линия 1, 3, 5 на рис. 3) и емкости конденсаторов (линия 2, 4, 6 на рис. 3). Участок кривой, соответствующий снижению величины упругой силы в рассмотрение не принимается, так как интерес представляет лишь максимальное усилие. Из рис. 3 видно, что с увеличением напряжения и емкости максимальное значение усилия увеличивается. Время достижения максимального значения усилия изменяется незначительно в рассмотренном диапазоне изменения параметров.

На рис. 4 представлены результаты расчета величины усилия, возникающего в упругой связи в зависимости от соотношения массы контейнера и приведенной массы мельящих тел и измельчаемого материала. Параметры разряда  $U=40$  кВ,  $C=2.0$  мкФ,  $m=1$  кг. Из рис. 4 видно, что увеличение приведенной массы мельящих тел приводит к увеличению усилия в слое измельчаемого материала. Увеличение соотношения  $\frac{m_1}{m}$  от 1 до 10 приводит к увеличению упругой силы более в чем 100 раз. Масса контейнера должна быть как можно меньшей. Рациональное соотношение массы контейнера и массы помольных тел позволит достичь наибольших усилий при наименьших затратах энергии.

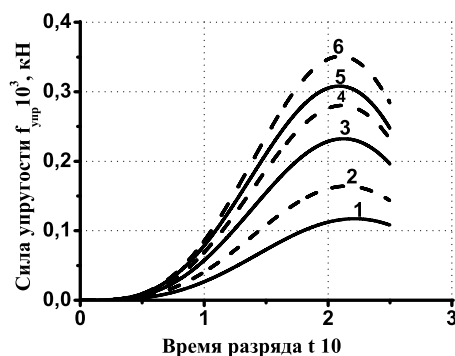


Рис. 3. Зависимость величины усилия в измельчаемом материале от времени:  
1 –  $U=15$  кВ,  $C=2.0$  мкФ, 2 –  $C=1.0$  мкФ,  $U=40$  кВ, 3 –  $U=40$  кВ,  $C=2.0$  мкФ, 4 –  $C=3.0$  мкФ,  $U=40$  кВ, 5 –  $U=60$  кВ,  $C=2.0$  мкФ, 6 –  $C=5.0$  мкФ,  $U=40$  кВ

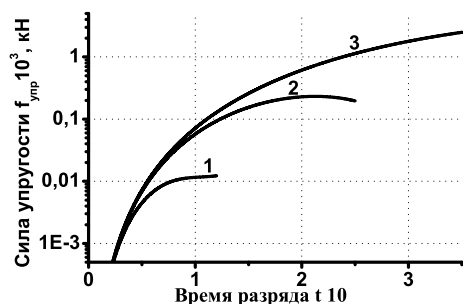


Рис. 4. Зависимость величины усилия в измельчаемом материале от соотношения  $\frac{m_1}{m}$ :  
 $1 - \frac{m_1}{m}=1$ ,  $2 - \frac{m_1}{m}=2$ ,  $3 - \frac{m_1}{m}=10$

## ВЫВОДЫ

Результаты математического моделирования процесса диспергирования материала в помольной камере ЭГИ диспергатора позволяют сделать следующие выводы.

1. Совместное решение уравнения динамики разрядной полости с системой уравнений динамики контейнера и помольных тел позволяет определить основные закономерности процессов, происходящих в механической системе диспергатора.
2. Основными параметрами ВИЭР, влияющими на процесс механического диспергирования в помольной камере, являются напряжение разряда и емкость конденсаторов. При этом ожидается прямая зависимость между указанными параметрами и интенсивностью диспергирования.
3. Основным динамическим параметром механической системы диспергатора с контейнером и помольными телами является отношение массы контейнера и приведенной массы помольных тел  $\frac{m_1}{m}$ . Уменьшение массы контейнера и увеличение приведенной массы помольных тел позволит наиболее полно использовать энергию пульсации разрядной полости для диспергирования материалов.

1. Акуличев А. В. Пульсации кавитационных полостей // Мощные ультразвуковые поля. – М.: Мир, 1968. – С. 167–220.
2. Виноградов Б. В. Динамика вертикальной электроимпульсной мельницы // Вопросы химии и химической технологии. – 2007. – N 3. – С. 173–176.
3. Виноградов Б. В., Федин Д. А., Никулин Д. С. Особенности гидродинамических процессов при импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. – N 2. – С. 190–192.
4. Виноградов Б. В., Федин Д. А. Управление динамикой процесса кавитации при импульсном электрическом разряде в ограниченном объеме жидкости // Сборник научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: НГУ, 2005. – С. 49–51.
5. Иванов В. В., Швец И. С., Иванов А. В. Подводные искровые разряды. – Киев: Наукова думка, 1982. – 192 с.
6. Косенков В. М., Каменская Л. А., Старков Н. В. Определение давления на пластину в замкнутой разрядной камере // Акустичний вісник. – 2005. – 8, N 1-2. – С. 64–68.
7. Либерман Л. Б. Воздействие слабых ударных волн на упругие преграды с конструктивными неоднородностями // Акустичний вісник. – 1999. – 2, N 3. – С. 60–68.
8. Мамутов А. В, Мамутов В. С., Поздов К. И., Тарелкин С. М. Компьютерное моделирование электрогидроимпульсной вытяжки-формовки // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДГМА, 2004. – С. 45–52.
9. Федин Д. А. Исследование динамики кавитации при импульсном электрическом разряде в камере с упругим элементом // Вопросы химии и химической технологии. – 2005. – N 4. – С. 171–174.