

Внутренняя баллистика электроимпульсного генератора ультразвугой

КОЛОМЕНСКАЯ В.В.

Донецкий национальный университет

Рассмотрена задача о формировании высокоскоростной импульсной струи жидкости при направленном электрическом разряде в коаксиальной электродной системе с открытой торцевой частью. Решение выполнено численно методом «распада разрыва» в осесимметричной постановке. Исследовано влияние геометрии разрядной камеры и режима осуществления разряда на параметры струи. Установлено преимущество генераторов с конической формой сопла по сравнению с цилиндрической формой по эффективности выстрела – и по скорости и по давлению. Выяснен механизм разрушения струи в генераторах с цилиндрическим соплом.

Розглянута задача про формування високошвидкісного імпульсного струменя рідини при напрямленому електричному розряді в коаксіальній електродній системі з відкритою торцевою частиною. Рішення виконане чисельно методом «розпаду розриву» у вісисиметричній постановці. Досліджений вплив геометрії розрядної камери і режиму здійснення розряду на параметри струменя. Встановлена перевага генераторів з конічною формою сопла у порівнянні із циліндричною формою за ефективністю пострілу – і за швидкістю і за тиском. З'ясований механізм руйнування струменя в генераторах з циліндричним соплом.

The generation of the high-speed pulse liquid jet under directed charge into coaxial electrode system with opened end is presented. Solution is obtained by numerical method with «breakdown discontinuity» at axisymmetric statement. The influence on the jet parameters from discharge camera geometry and mode is studied. The advantages of generators with conical nuzzle part compared with cylindrical one are determined. The jet destruction at generators with cylindrical nuzzle part is researched.

Введение. Развитие гидравлических технологий привело к созданию многочисленных установок для получения высоконапорных стационарных водяных струй. Они нашли применение при проходке нефтяных и газовых скважин, при механической резке различных материалов, при чистке их поверхностей, при разрушении горных пород и т. п. Однако спектр применения стационарных струй ограничивается их сравнительно небольшим напором.

Преодолеть этот барьер позволяют гидроимпульсные установки, способные генерировать струи, движущиеся со скоростями порядка нескольких км/с и обладающие динамическим напором в сотни МПа (ультраструй) [1 - 4]. Такие импульсные струи позволяют разрушать породы любой крепости и абразивности. Однако закономерности получения ультразвугой и механизмы их воздействия на материалы ещё недостаточно изучены.

Основными принципами получения ультразвугой являются вытеснение жидкости через малое отверстие, ускорение жидкости при её втекании в сужающееся сопло и гидродинамическая кумуляция.

Ускорение жидкости в конкретных устройствах может происходить за счёт работы сжатого газа (импульсный водомёт, гидропушка [1]), за счёт расширения парогазовой полости, возникающей в результате электрического разряда в воде (электроимпульсный водомёт [1, 2], электроимпульсный генератор [3]), за счёт взрыва ВВ (пороховая гидропушка, пороховой импульсный водомёт [4]).

Установки, использующие энергию электрического взрыва, представляют особый интерес, так как сочетают легко осуществимый и эффективный способ преобразования энергии, который даёт электрогидравлический эффект, с применением импульсных струй в качестве инструмента воздействия на материалы.

В одной из них – электроимпульсном водомёте – электрический разряд осуществляется в камере с электродами, расположенными на противоположном от сужающегося сопла конце. Исследование этой установки показало, что с её помощью можно получить струи,

движущиеся со скоростями до 1000 - 1200 м/с. Характер истечения струй резко нестационарный [1, 2].

В другой конструкции – электроимпульсном генераторе – используется коаксиальная электродная система. Известны установки с коаксиально-коническими и коаксиально-цилиндрическими электродами [3].

1. Формирование ультразвугой при направленном электрическом разряде. В устройствах такого типа (рис. 1) пространство между электродами, одним из которых является стенка осесимметричного канала 1, а другим – центральное тело 2, заполнено водой 3. Электроды разделены изолятором 4. В начальный момент от высоковольтного конденсатора 5 через цепь коммутации 6 на электроды подаётся импульс высокого напряжения. Возле закрытой торцевой части устройства инициируется электрический пробой жидкости, образуется канал разряда 7. В канал разряда вводится электрическая энергия, давление в нём возрастает и он, расширяясь, приводит воду в движение. В проточной части камеры жидкость ускоряется как в осевом, так и в радиальном направлениях и выбрасывается через открытое торцевое сечение 8 в виде высокоскоростной импульсной струи.

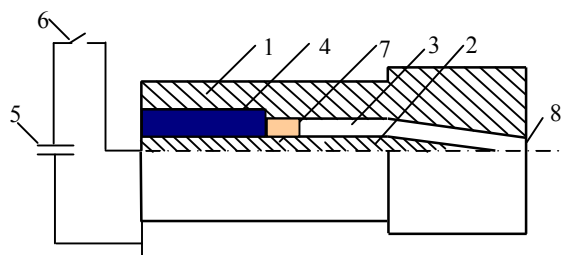


Рис. 1

Экспериментальные исследования этих установок показали, что на параметры струи оказывают большое влияние геометрия разрядной камеры и режим осуществления разряда [3].

Для выяснения механизма влияния указанных факторов на параметры струи и достижения максимальной эффективности выстрела в настоящей работе рассмотрена задача численного исследования внутренней баллистики электроимпульсного генератора.

3. Формулировка математической модели.

Источником движения жидкости в установке является парогозовая полость, образующаяся при подводном искровом разряде. Взаимодействие парогозовой полости с жидкостью носит сложный динамический характер и может быть выделено в самостоятельную задачу, которая, однако, может быть решена только при совместном решении с задачей о движении жидкости. Учёт движения жидкости вытекает из тех соображений, что на границе «парогозовая полость - жидкость» должны выполняться определённые граничные условия, вид которых зависит от принятых моделей движения среды в полости и в жидкости.

В настоящей работе выбрана наиболее распространённая модель движения парогозовой полости: среда в полости считается идеальным газом с эффективным показателем адиабаты $\gamma = 1,26$; параметры состояния среды осредняются по объёму полости, и их изменение рассчитывается в квазистационарном приближении; закон ввода энергии считается заданным; на границе полости не происходит никаких фазовых превращений, граница является непроницаемой в смысле переноса тепла и вещества [5]. Таким образом, вся энергия, передаваемая газу, идет на увеличение его внутренней энергии и на работу по расширению полости:

$$\gamma p_c \frac{dV_c}{dt} + V_c \frac{dp_c}{dt} = (\gamma - 1)N(t).$$

Здесь p_c и V_c - давление в полости и её объём, t - время, $N(t)$ - закон подвода электрической мощности в полость.

Кратковременность ввода энергии приводит к существенной нестационарности в жидкости, ярко выраженной волновой картине течения. Характерной особенностью расчёта нестационарных движений сплошных сред является учёт их сжимаемости [1, 4]. Быстротечность процесса, с другой стороны, позволяет пренебречь вязкостью и теплопроводностью в жидкости.

В принятой постановке движение жидкости описывается системой уравнений нестационарной газовой динамики, которая в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u r}{\partial x} + \frac{\partial \rho v u}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial \rho u r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\rho u^2 + p)r] + \frac{\partial \rho u v r}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial \rho v r}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v r}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial r} [(\rho v^2 + p)r] &= p. \end{aligned}$$

Здесь где t - время, x и r - осевая и радиальная координаты, u и v - компоненты скорости по осям x и r , p - давление, ρ - плотность. Замыкается система уравнением состояния воды для сжимаемой жидкости в форме Тэта [6]:

$$p = B[(\rho/\rho_0)^n - 1],$$

где $\rho_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$ - плотность воды при нормальных условиях, $B = 304,5 \text{ МПа}$, $n = 7,15$ - показатель адиабаты воды.

Граничные условия ставятся на трёх поверхностях раздела:

1) «рабочая камера - жидкость»: условие равенства нулю нормальной компоненты скорости w_n (внутренняя поверхность камеры считается абсолютно жёсткой):

$$w_n(R_1, t) = 0, \quad w_n(R_2, t) = 0,$$

где $R_1 = R_1(x)$ - уравнение внутренней поверхности камеры, $R_2 = R_2(x)$ - уравнение поверхности центрального тела.

2) «парогозовая полость - жидкость»: условие равенства давлений и нормальных компонент скоростей сред по обе стороны поверхности:

$$p(x_c, t) = p_c(t), \quad w_n(x_c, t) = w_c = \frac{dx_c}{dt},$$

где x_c - осевые координаты точек на границе парогозовой полости, w_c - скорость расширения полости.

3) «срез сопла»: условие равенства нулю давления (считаем, что истечение происходит в вакуум):

$$p(x_s, r_s, t) = 0,$$

где x_s, r_s - координаты точек среза сопла.

Начальные условия для задачи следующие:

$$1) u(x, r, 0) = 0, \quad v(x, r, 0) = 0, \quad p(x, r, 0) = 0; \quad x, r \in \Omega.$$

Здесь Ω - область, занятая жидкостью. Она ограничена поверхностями рабочей камеры, парогозовой полости и срезом сопла.

$$2) p_c(0) = p_{c0}, \quad V_c(0) = V_{c0}, \quad x_c(0) = x_{c0},$$

где p_{c0} и V_{c0} - начальные давление и объём полости, x_{c0} - начальные координаты границы полости.

Таким образом, задача о движении жидкости в коаксиальном канале с центральным телом математически сводится к решению системы уравнений в частных и обыкновенных производных с перечисленными выше начальными и граничными условиями. Аналитического решения система не имеет, её решение было выполнено численно методом «распада разрыва» С.К. Годунова [7], обобщенным на расчёт нестационарных движений жидкости [1].

Расчёты проводились в подвижной сетке, опирающейся на границу парогозовой полости и поверхность среза сопла. В ствольной части сетка подвижная, закон её изменения обусловлен перемещением поверхности парогозовой полости, в области сопла сетка неизменная. Зависимость $N(t)$ бралась из эксперимента [8]. В расчётах выяснялось влияние геометрии разрядной камеры, величины вводимой в канал разряда энергии, времени ввода энергии на внутреннюю баллистику генератора.

3. Результаты численного расчёта. Согласно экспериментальным данным [3], очень сильное влияние на эффективность выстрела по скорости истечения и по давлению оказывает соотношение диаметров электрода-камеры d_1 и электрода-стержня d_2 . Для определения оптимального соотношения диаметров электродов были получены зависимости скорости и давления на срезе сопла от времени в генераторах с коаксиально-конической и коаксиально-цилиндрической геометрии. Отношение диаметров d_1/d_2 варьировалось в пределах $1,75 \div 5$. Величина введённой в канал разряда энергии

$E_c = 15$ кДж, время её ввода $t_e = 10$ мкс, полный объём жидкости в камере $-V_\Omega = 0,1$ дм³.

В обеих установках влияние соотношения диаметров на параметры струи оказалось очень сильным. На рис. 2 приведены зависимости скорости истечения струи от времени. Кривые 1, 2, 3 – для $d_1/d_2 = 1,75; 3; 5$, соответственно. Здесь и далее – сплошные кривые – для генератора с конической, пунктирные – для генератора с цилиндрической геометрией.

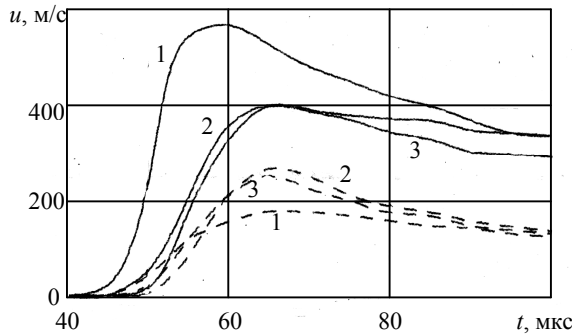


Рис. 2

Видно, что для установок с коаксиально-конической проточной частью максимальная скорость истечения соответствует $d_1/d_2 = 1,75$, а в установках с цилиндрической геометрией – $d_1/d_2 = 3$, что согласуется с экспериментальными данными.

Значительное преимущество генераторов с конической геометрией по скорости истечения, наглядно демонстрируемое на графиках, связано, очевидно, с тем, что в коаксиально-цилиндрическом генераторе ускорение жидкости происходит только за счёт расширения парогазовой полости, а в коаксиально-конической установке добавляется ускорение за счёт взаимодействия волн сжатия с сужающимся соплом. Здесь, как и в гидрорупке [1], реализуется инерционный принцип разгона жидкости, основанный на том, что в потоке нестационарно движущейся жидкости происходит перераспределение энергии. При этом передние частицы ускоряются, и их скорость значительно превышает среднюю энергетическую. Влиянием этого дополнительного ускорения объясняется, очевидно, различие и в характере истечения для генераторов двух типов при варьировании соотношений диаметров наружного и внутреннего электродов. В генераторах с коническим соплом дальнейшее перераспределение энергии приводит к тому, что наиболее выгодным является такое соотношение диаметров электродов, при котором частицы, граничащие с контактной поверхностью, получают наибольшую кинетическую энергию.

Изменение со временем давления на оси струи в сечении среза сопла показано на рис. 3. В коаксиально-коническом генераторе во всех вариантах давление значительно больше, чем в коаксиально-цилиндрическом, что создаёт большую нагрузку на корпус установки и является нежелательным. Однако интерференция волн разрежения, возникающих при отражении от среза со-

пла идущих от расширяющейся парогазовой полости волн сжатия, приводит к разгрузке давления в камере.

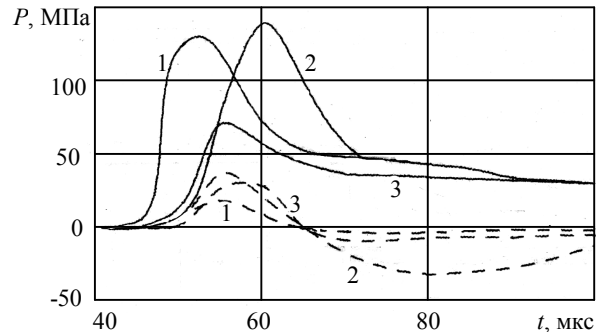


Рис. 3

Различие в величинах давлений приводит к различным физическим картинам истечения в цилиндрическом и коническом генераторах. В генераторе с коническим соплом за счёт радиального течения, сжимающего струю к оси, и большей начальной величины давление при истечении струи понижается меньше, а в генераторах с цилиндрическим соплом зоны пониженного давления развиваются в откол (жидкость разрушается). В расчётах это соответствует появлению отрицательных давлений. Возникший откол делает струю нестабильной.

Не менее сильное, чем геометрия камеры, воздействие на эффективность истечения струи оказывают энергетические характеристики разряда. Изучение влияния величины периода полного выделения энергии в канал разряда t_e на параметры истечения струи показало, что качественно при разных t_e картины изменения скорости и давления на срезе сопла в обеих конструкциях совпадают.

Вместе с тем при увеличении t_e максимум скорости истечения u_{max} достигается позднее, но его величина больше, и спад скорости происходит медленнее. При введённой энергии $E_c = 15$ кДж, $V_\Omega = 0,1$ дм³, $d_1/d_2 = 3$ в коаксиально-коническом генераторе u_{max} составляет 400 м/с для $t_e = 10$ мкс и 480 м/с для $t_e = 100$ мкс, в коаксиально-цилиндрическом u_{max} равны, соответственно, 250 м/с и 270 м/с.

Максимум давления p_{max} на срезе сопла, как и максимум скорости, при увеличении t_e достигается быстрее, но в отличие от скорости, с увеличением t_e p_{max} уменьшается, и спад давления происходит медленнее. В коническом генераторе при $t_e = 10$ мкс $p_{max} = 140$ МПа, при $t_e = 100$ мкс – 70 МПа, в цилиндрическом, соответственно, 45 и 25 МПа. При более медленном вводе энергии развитие откола в цилиндрическом генераторе происходит позже.

Расчёты по оценке влияния величины вводимой энергии E_c показали, что с увеличением E_c давление