

УДК 532.522.2:537.528

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ ПРИ МЕТАНИИ ЖИДКОСТИ ПЛАЗМЕННЫМ УСКОРИТЕЛЕМ

МАЛЮШЕВСКИЙ П. П.

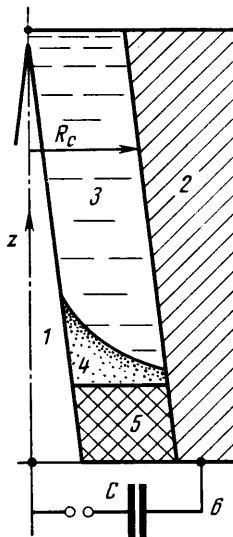
Приводятся результаты экспериментальных исследований процесса получения кумулятивных струй воды при электрическом разряде в плазменном ускорителе. Обсуждается физический механизм их формирования в плазменном ускорителе и при истечении в воздух.

При изучении импульсных плазменных ускорителей, работающих в конденсированной среде [1–4], отмечен ряд особенностей истечения жидкости за пределы активной зоны ускорителя. Одной из них является генерирование кумулятивных струй на фоне ультраструй, истекающих при каждом электрическом разряде в ускорителе. В исследованиях кумуляции при импульсном истечении жидкости [5–8] рассматриваются различные модели образования кумулятивных струй. Однако ни одна из известных моделей не объясняет механизма возникновения кумулятивных струй при метании жидкости импульсным плазменным ускорителем.

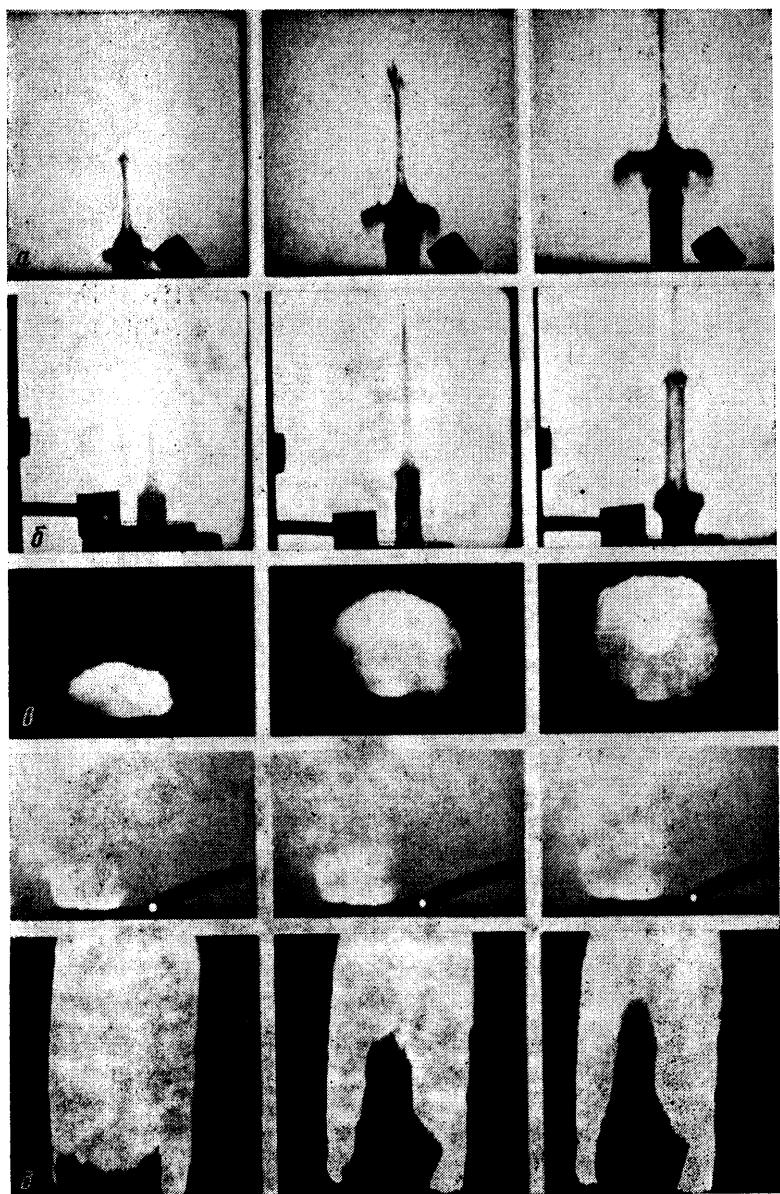
На фиг. 1 показана схема импульсного плазменного ускорителя. Он состоит из стержневого анода 1 и кольцевого катода 2, образующих коаксиальный кольцевой канал 3, заполняемый жидкостью, которые подсоединялись к батарее конденсаторов с запасаемой энергией $W_0=3,7$ кДж внешнего разрядного контура 6. Ёмкость батарей конденсаторов изменялась в соответствии с варьированием напряжения зарядки $U_0=12\text{--}50$ кВ при $W_0=\text{const}$. Для согласования малоиндуктивной нагрузки плазменного образования 4 в ускорителе с разрядным контуром применялся импульсный кабельный трансформатор. Максимум разрядного тока достигал 250 кА. Электроды устанавливались через проходной изолятор 5. Кольцевой канал ускорителя заполнялся водой или смесью воздуха с парами воды, а метание среды, заполняющей канал, осуществлялось в атмосферу при нормальном давлении воздуха либо в камеру с разреженным (до 0,01 МПа) воздухом. Для гарантированного формирования сомкнутого плазменного образования в кольцевом канале в начальный момент разряда производился на тонкую проволочку, замыкающую противоэлектроды как один виток спирали. Коаксиальный кольцевой канал к выходу из ускорителя сужался, образуя усеченный конус с углом при вершине 25°.

Процесс истечения ультраструй и динамика кумулятивных струй регистрировались на кинопленку с помощью высокоскоростного фотопротографатора ВФУ-1. Момент начала ввода энергии в разряд регистрировался с помощью световода, располагаемого между торцевым срезом ускорителя и искрой в коммутирующем разряднике.

Характерные формы истечения ультраструй и формируемых кумулятивных струй для разных режимов работы плазменного ускорителя



Фиг. 1



Фиг. 2

приведены на фиг. 2: *а* и *б* — истечение воды в воздух при нормальном давлении и в разреженный (0,01 МПа) воздух при разряде конденсаторной батареи непосредственно на плазменный ускоритель, *б* — истечение воды при разряде конденсаторной батареи на ускоритель через кабельный трансформатор, *в* и *г* — истечение смеси водяного пара и воздуха — $W_0=25$ и 3,7 кДж.

При формировании сомкнутого кольцевого плазменного образования в активной зоне плазменного ускорителя движение плазмы генерирует импульсные струи сложной структуры (см. фиг. 2, *а*). Через 70 мкс после зажигания разряда регистрируется начало истечения воды за пределы ускорителя в виде компактной ультраструи диаметром d_s , равным диаметру сопла. На участке пути вдоль оси ультраструи, существенно меньшем ее диаметра, голова струи теряет устойчивость, приобретая форму

вихревого кольца, а по оси быстро развивается кумулятивная струйка диаметром у основания (примерно в плоскости раздела с основной струей) $d_p \approx 0,1d_s$. Струйка имеет хорошо выраженную форму – сходится в острие, на котором «сидит» развалившееся вихревое кольцо. Оно движется вместе с головной частью кумулятивной струйки, как бы вытягивая ее и постепенно теряя свое вещество рассеиванием в виде облака мельчайших брызг, сохраняющего некоторое время признаки вихревого движения. Голова ультраструи также замыкается крупным распадающимся вихревым кольцом, под которым видны взаимно перемещающиеся «играющие» вихревые кольца третьего и четвертого порядка. В приведенном примере ультраструя и кумулятивная струя сохраняют компактность и имеют скорости соответственно $V_1 = 118$ м/с и $V_2 = 370$ м/с. Применение согласующего кабельного трансформатора позволяет осуществлять разряды, близкие к апериодическим; при этом картина истечения кумулятивных струй становится более контрастной, скорости увеличиваются, может появиться ультраструя, из которой генерируются последовательно две смыкающиеся кумулятивные струи (см. фиг. 2, б). Здесь $V_1 = 155$ м/с, $V_2 = 715$ м/с – скорость головной кумулятивной струи, $V_3 = 450$ м/с – скорость первой кумулятивной струи. При увеличении энергии, вводимой в разряд, скорости V_1 и V_2 увеличиваются ($V_1 = 800$ м/с и $V_2 = 2100$ м/с при $W_0 = 25$ кДж), но качественно картина истечения не изменяется. Вихревое движение при истечении вещества из плазменного ускорителя хорошо регистрируется (см. фиг. 2, в, г) при замене воды смесью воздуха с водяным паром (разряд инициируется по поверхности тонкого слоя воды глубиной около 0,5 см на проходном изолятore), хотя вязкость газа существенно меньше вязкости воды. Эти аномально долго существующие плазменные вихревые кольца генерируются аналогично [10], и здесь важную роль играет вязкость струи [12].

Для различных режимов истечения эти плазменные вихри существуют от 10 до 100 мс, хотя разряд завершается за 80–120 мкс. Распределение концентрации электронов в таких плазменных образованиях подтверждает визуально наблюдаемую вихревую структуру.

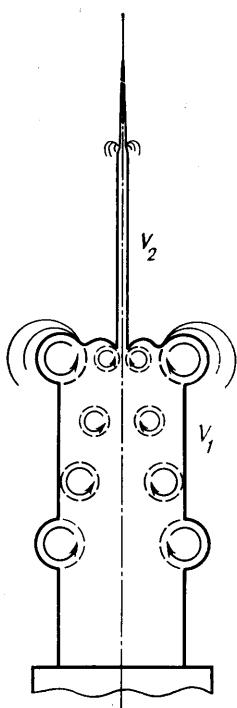
Теоретический анализ [4] внутренней баллистики активной зоны плазменного ускорителя с водой в качестве рабочей среды проводился в соответствии с классическими представлениями об импульсных течениях соответствующей геометрии без учета вязкости жидкости. Он показал, что ни один из расчетных режимов (в том числе соответствующих экспериментальным) не обнаруживает кумуляцию на продольной оси ультраструи, хотя и показывает в первые моменты истечения на 10–15% большую скорость в этой зоне по отношению к скорости участков, находящихся на расстоянии половины радиуса струи. В целом же скорость плавно спадает от оси к внешней границе ультраструи. Заметим, однако, что расчетная скорость ультраструи соответствует получаемой экспериментально с точностью 5–10%.

Внимательное изучение материалов известных экспериментальных исследований высоконапорных импульсных струй воды [7, 8], генерируемых импульсными водомётами [13], показало, что характер истечения жидкости из плазменного ускорителя с конденсированной средой существенно иной. Струи, генерируемые плазменным ускорителем, в отличие от [7, 8] оказываются устойчивыми; здесь имеются четко разделенные участки кумулятивной и ультраструи, они не разрушаются при взаимодействии с плотным воздухом атмосферы, а только стабилизируются. Высоконапорные импульсные струи [7, 8] не имеют кумулятивных выбросов и фактически движутся, разрушаясь при взаимодействии с воздухом, в облаке брызг. Таким образом, их динамика и течения в них существенно отличаются от наблюдаемых для струй, генерируемых плазменным ускорителем.

Столь противоположное влияние плотного атмосферного воздуха,

в одном случае стабилизирующего устойчивость импульсной струи, в другом — способствующего потере устойчивости, может быть объяснено только тем, что воздух не дает возможности быстро развалиться вихревым кольцам на ультраструктуре и соответственно способствует «игре» водяных колец [5] в ультраструктуре. Это подтверждает эксперимент по выбросу ультраструктуры из плазменного ускорителя в вакуумируемую камеру (фиг. 2, δ). С понижением давления в камере ультраструктуры становятся неустойчивыми и при давлениях ниже 0,06 МПа кумулятивные струи не образуются, а первое же вихревое кольцо сразу после выхода за срез ускорителя теряет устойчивость и разваливается.

Механизм формирования ультра- и кумулятивных струй жидкости следующий. За счет несимметричности магнитного давления и особенностей течения в кольцевом коаксиальном канале участки сокнутого плазменного образования, прилегающие к аноду 1 (см. фиг. 1), движутся быстрее, чем более удаленные от оси z по радиусу R_c . Соответственно с самого начала процесса ускорения приосевые участки жидкости также приобретают большую скорость, поэтому на выходе из активной зоны за анодом в приосевой области непрерывно поддерживается зона пониженного давления. Граница раздела плазменный поршень — вода под действием периодически изменяющегося газокинетического давления (изменение тока разряда по величине и знаку) пульсирует и передает этот характер движения ускоряемой жидкости.



Фиг. 3

За счет наличия сил трения и вязкости при пульсирующем режиме ускорения на внешней границе вязкого подслоя у стенок активной зоны начинается [14] интенсивный рост турбулентных вихрей, их попарное слияние и формирование группы вихревых колец, ускоряемых на выходе из активной зоны. Согласно [14], расстояние от стенки до внутренней границы области роста вихрей оценивается формулой

$$y = 0,44R_c(z) \quad (1)$$

где $R_c(z)$ — текущее значение радиуса активной зоны.

Частота вращения вихрей определяются градиентом осредненной скорости движения жидкости в данном сечении

$$\omega = \frac{1}{2} \frac{d\langle U \rangle}{dy} \quad (2)$$

Схема кумуляции при «игре» вихревых колец представлена на фиг. 3, где V_1 — скорость ультраструктуры, V_2 — скорость кумулятивной струи. Наблюдаемые вихри имеют большое сходство с тороидальными вихрями Maxwell [5], где завихренная область представляет собой тор, радиус поперечного сечения которого a меньше радиуса R самого тора. Такие вихри движутся со скоростью

$$v = \frac{\Gamma}{4\pi R} \left(\log \frac{8R}{a} - \frac{1}{4} \right) \quad (3)$$

где $\Gamma = 2\omega\sigma$ — циркуляция скорости по элементарному замкнутому контуру, σ — площадь сечения вихревой трубки.

По-видимому, имеется «склейка» потенциального и вихревого движе-

ния на оси, хотя считается [5], что экспериментально такую форму течения получить нельзя из-за ее большой неустойчивости.

Как только первое вихревое кольцо подходит к выходу из ускорителя, оно подтормаживается неподвижным воздухом и полем скоростей, инициированным задним кольцом, и слегка расширяется (см. фиг. 2, а и 3) [6]. Заднее кольцо, напротив, сужается и ускоряет свое поступательное движение, чему способствует наличие зоны пониженного давления в приосевой области. Происходит «игра» вихревых колец [6].

В результате «игры» заднее кольцо нагоняет переднее и, сжимаясь, проходит внутри него. Резкое уменьшение R приводит к увеличению ω и уменьшению σ (в соответствии с тем, что $\omega\sigma=\text{const}$). Часть вещества, захваченного вихревым движением, выбрасывается из вихря на продольной оси как кумулятивная струя, а часть рассеивается в виде мелких брызг — остатков вихря, разорванного действием центробежных сил.

С учетом экспериментально полученных параметров ультраструй, представленных на фиг. 2, а, б, оценка параметров течений по формулам (1)–(3) позволяет определить частоту вращения основного вихря в голове «медленной» струи $\omega_{1a} \approx 0,37 \cdot 10^5$ Гц и частоту вращения внутреннего в данный момент вихревого кольца, проходящего сквозь внешнее кольцо (см. фиг. 2, а), в момент максимального сжатия $\omega_{2a} \approx 0,93 \cdot 10^5$ Гц. Соответственно находятся частота вращения внешнего вихревого кольца в голове «медленной» струи второй ступени кумуляции $\omega_{1b} \approx 0,45 \cdot 10^5$ Гц, частота вращения внутреннего вихревого кольца, в данный момент проходящего сквозь первое вихревое кольцо, $\omega_{2b} \approx 1,21 \cdot 10^5$ Гц и частота вращения внутреннего вихревого кольца, ранее прошедшего сквозь первое при первой ступени кумуляции (см. фиг. 2, б), $\omega_{3b} \approx 1,83 \cdot 10^5$ Гц. Скорости истечения кумулятивных выбросов по порядку величин соответствуют наблюдаемым экспериментально.

Отметим, что при таких высоких угловых скоростях вращения вихря должно иметь место подсасывание с тыльной стороны вихревого кольца, что дополнительно ускоряет головные части кумулятивных струй, придавая им характерную коническую форму.

В механизме потери устойчивости и разрушения вихревого кольца определенную роль могут сыграть кавитационные явления, которые неизбежно развиваются на кольцевой оси вихря при резком увеличении частоты вращения. Вихревое кольцо, которое иногда наблюдается в голове кумулятивного выброса, может получать дополнительную скорость за счет отбрасывания воздуха, которое происходит на границе вращающейся жидкости [5].

Выявленные особенности развития кумулятивных возмущений при взаимодействии системы вихревых колец в ультраструктуре являются следствием нелинейного характера этого взаимодействия, усиливающегося при движении жидкости в неподвижном воздухе. Следует отметить, что в целом полученная картина генерирования кумулятивных струй воды вихревыми кольцами, образующимися благодаря специфическим условиям плазменного ускорителя, не имеет аналогов.

Таким образом, показано, что система вихревых колец, генерируемых при электрическом разряде в плазменном ускорителе, заполненном жидкостью, может служить еще одним средством кумуляции энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малюшевский П. П. Источник генерируемых электрическим разрядом жидкостных струй // Электрический разряд в жидкости и его применение. Киев: Наук. думка, 1977. С. 26–34.
2. Немировский А. З., Малюшевский П. П., Голубенко Ю. Г. К выбору эффективного режима плазменного ускорителя в конденсированных средах // Журн. техн. физики. 1978. Т. 48. Вып. 9. С. 1871–1876.
3. Малюшевский П. П., Пастухов В. Н., Стрельцов В. А. Плазменный ускоритель в

- конденсированной среде // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1982. № 8. Вып. 2. С. 63–70.
4. Голубенко Ю. Г., Канивец В. В., Малюшевский П. П., Семко А. Н. Формирование импульсных струй жидкости при направленном электрическом разряде // Тез. докл. 6-го Всесоюз. съезда по теоретической и прикладной механике. Ташкент: Нац. комитет СССР по теорет. и прикл. механике. 1966. С. 204.
 5. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 407 с.
 6. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. М.: Наука, 1964. 815 с.
 7. Бородин В. П., Войцеховский Б. В. Применение искровой съемки для исследования высоконапорных импульсных струй // ПМТФ. 1965. № 3. С. 100–102.
 8. Бородин В. П. Исследование высоконапорных импульсных струй при помощи рентгенографии // ПМТФ. 1965. № 5. С. 160–162.
 9. Бузуков А. А., Кузовов В. Т. Выпрыгивающие вихри // Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1969. Вып. 3. С. 70–73.
 10. Райзер Ю. П., Силантьев А. Ю., Суржиков С. Т. Дозвуковое вихревое движение газа в условиях интенсивного энерговыделения в оптическом плазмотроне // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 12. № 3. С. 134–138.
 11. Лахин В. П., Михайловский А. Б., Новаковский С. В. Коротковолновые вихри в плазме конечного давления // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 5. С. 566–574.
 12. Бондарев Е. И., Бургасов М. П., Васильев И. А., Косарев А. С. Поле плотности струи вязкого газа, истекающего из конического сопла в вакуум. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 3. С. 25–38.
 13. Лаврентьев М. А., Антонов Э. А., Войцеховский Б. В. Вопросы теории и практики импульсных водяных струй. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1961. 72 с.
 14. Сурков С. В. О каскадном характере роста турбулентных вихрей // Инж.-физ. журн. 1985. Т. 48. № 4. С. 561–568.

Николаев

Поступила в редакцию
10.VIII.1987