

ЯВЛЕНИЕ КУМУЛЯЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ (ЧАСТЬ II. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Одна из первых попыток теоретически описать явление [1] исходя из внутренней баллистики активной разрядной зоны плазменного ускорителя с водой в качестве рабочей среды была предпринята в соответствии с современными представлениями об импульсных течениях соответствующей геометрии без учета сил вязкости, действующих в приграничных со стенкой активной зоны слоях жидкости. Анализ показал, что ни один из расчетных режимов (в том числе и соответствующих экспериментальным) не обнаруживает кумуляцию на продольной оси ультраструи, хотя и показывает в первые моменты истечения скорость в этой зоне на 10–15% большую скорости участков, находящихся на расстоянии половины радиуса струи. В целом же скорость плавно снижается от оси к внешней границе ультраструи. Заметим, что расчетная скорость ультраструи соответствует скорости струи, получаемой экспериментально. Выявилось недопонимание природной сути наблюдаемого явления.

Внимательное изучение материалов известных [2, 3] экспериментальных исследований высоконапорных импульсных струй воды, генерируемых импульсными водометами [4], показало, что характер истечения жидкости из плазменного ускорителя с конденсированной средой существенно иной. Струи, генерируемые плазменным ускорителем, в отличие от [2, 3] оказываются значительно более устойчивыми; здесь имеются четко разделенные участки кумулятивной струи и ультраструи, они не разрушаются при взаимодействии в сверхзвуковом движении сквозь плотный воздух атмосферы, но, очевидно, только стабилизируются. Высоконапорные импульсные струи [2, 3] не имеют кумулятивных выбросов и движутся, фактически разрушаясь при взаимодействии с воздухом, превращаясь в облако брызг. Таким образом, их морфология, динамика и течения существенно отличаются от наблюдаемых для струй, генерируемых плазменным ускорителем и взаимодействующими в ультраструе вихревыми кольцами (см. рис. 1).



Рис. 1. Кадр кинограммы истечения ультраструи воды из плазменного ускорителя (хорошо видны взаимодействующие вихревые кольца, выбрасывающие кумулятивную струю)

Столь противоположное влияние плотного атмосферного воздуха, в одном случае стабилизирующего устойчивость импульсной струи, в другом – способствующего потере устойчивости, может объясняться только различием структур истекающих струй. Воздух не дает возможность быстро раз-

валиться вихревым кольцам в ультраструе и соответственно способствует "игре" водяных вихревых колец [5] в ней. Это подтверждает эксперимент по метанию плазменным ускорителем ультраструй из плазменного ускорителя в вакуумируемую камеру. С понижением давления воздуха в камере ультраструи становятся неустойчивыми, и при давлении ниже 0,06 МПа кумулятивные выбросы не образуются (см. рис. 2), а первое вихревое кольцо сразу после выхода за срез ускорителя теряет устойчивость и разваливается. Иное дело – движение метаемых ультраструй в плотном воздухе.

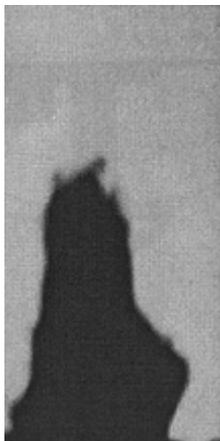


Рис. 2. Выброс ультраструи в вакуумируемую камеру (виден "развал" вихревого кольца)

Процесс пронизывания плотного воздуха высокоскоростной водяной ультраструей без потери устойчивости существенно облегчается за счет того, что она вместе с "играющими" вихревыми кольцами генерирует кумулятивный выброс, движущийся со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе. То есть "материнская" ультраструя движется с дозвуковой (хотя и высокой) скоростью фактически внутри пространства, ограниченного конической, воздушной ударной волной, порождаемой головой кумулятивной струи (см. рис. 3), вернее, в маловозмущенной и менее плотной среде, возникающей за срезом ударной волны. Это те процессы, которые происходят вне плазменного ускорителя. Все же отличия начинаются внутри плазменного ускорителя, в его активной разрядной зоне.



Рис. 3. Схема расходящегося фронта ударной волны, порождаемой при движении со сверхзвуковой скоростью кумулятивной струи

Активная зона плазменного ускорителя представлена на рис. 4, где электрод–анод 1, электрод–катод 2, проходной изолятор 5 и свободная поверхность жидкости образуют характерное коак-

сиально-коническое пространство, в котором и находится метаемая доза жидкости 3. Выбрасывает жидкость плазменное образование 4, образующееся (изначально у внутренней торцевой поверхности проходного изолятора) после включения внешнего разрядного контура б.

Механизм формирования в активной зоне плазменного ускорителя ультраструй, а затем вне активной зоны кумулятивных струй жидкости следующий. За счет несимметричности магнитного давления тока разряда в радиально-щелевом пространстве активной зоны и особенности гидродинамики течения жидкости в кольцевом канале того же пространства участки сомкнутого плазменного образования, прилегающие к аноду 1, движутся быстрее, чем участки струи, по радиусу более удаленные от центральной оси. Соответственно с самого начала процесса ускорения приосевые участки жидкости приобретают большую скорость, придавая границе раздела плазма–жидкость коноидальную форму. Основной токовый слой простирается именно под этой поверхностью. На выходе из активной зоны за анодом в приосевой области непрерывно поддерживается зона пониженного давления. Граница раздела плазменный поршень–вода, двигаясь на выход из активной зоны, под действием изменения газокINETического и магнитного давлений пульсирует, ее скорость изменяется (см. рис. 5) в соответствии с изменением тока в разрядном контуре.

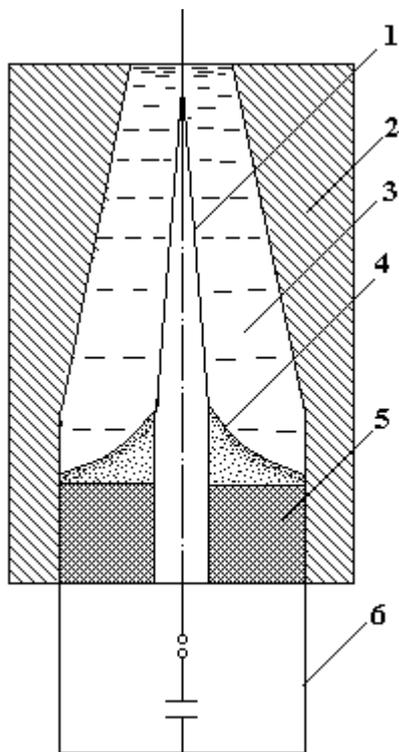


Рис. 4. Схема активной зоны плазменного ускорителя

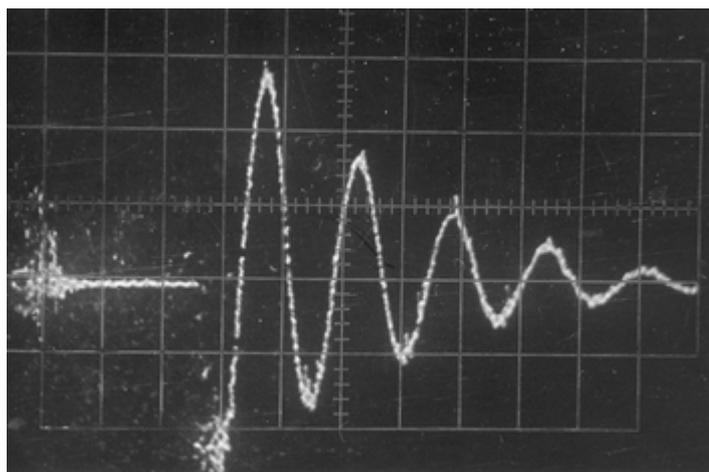


Рис. 5. Осциллограмма тока в разрядном контуре плазменного ускорителя (соответствует свечению плазменного поршня разряда на рис.5 в первой части данной статьи)

За счет наличия сил трения и вязкости при таком пульсирующем режиме ускорения на внешней границе вязкого подслоя у стенок, ограничивающих активную зону, начинается [6, 7] интенсивный рост турбулентных вихрей, их попарное слияние и формирование группы вихревых колец, ускоряемых на выходе из активной зоны. Дальнейший генезис системы взаимодействующих вихревых колец в ультраструе подробно рассмотрен в [8, 9], а макрокартина генерирования кумулятивного выброса может быть уточнена логически [10].

Характерным для систем вихревых колец является то, что вихревые линии представляют собой замкнутые окружности, центры которых расположены на одной прямой. Впервые такой класс движений вихрей в идеальной безграничной жидкости рассмотрен Г. Гельмгольцем [11], установившим, что вихревое кольцо малого конечного поперечного сечения движется, не изменяя радиуса центра тяжести поперечного сечения, с постоянной, но весьма большой скоростью, направленной в сторону, куда жидкость течет сквозь кольцо. В то же время у вихревого кольца обнаружено замечательное свойство – продвигаться на сравнительно большие (в сравнении с собственными размерами) расстояния, сохраняя во времени свою устойчивую форму. При определенных внешних воздействиях,

производящих как бы смыкание траекторий движения частиц жидкости в завихренности (внутренний диаметр тора вихревого кольца $d \rightarrow 0$), вихревое кольцо превращается в движущийся сферический вихрь (вихрь Хилла). Установлено [12], что при уменьшении d^4 от $a^4/4$ до 0 (здесь a – радиус сферического вихря Хилла) время полного оборота возрастает с $4a\pi/3Z$ до ∞ (Z – скорость вихря вдоль направления поступательного движения). Это важнейшее свойство вихревых колец, позволяющее в дальнейшем понять основу возникновения кумуляции при взаимодействии вихревых структур.

В экспериментальных исследованиях процессов истечения импульсных ультраструй из плазменных ускорителей обнаружено, что при определенных режимах метания жидкости (воды) возникает нетривиальное явление возбуждения вихревых колец непосредственно в ультраструе. Их всегда больше двух.

Теоретические исследования процессов взаимодействия нескольких вихревых колец наталкиваются на огромные математические трудности, и в настоящее время решение таких задач не существует [15]. Поэтому внимательное изучение полученных экспериментальных данных особенно интересно.

Вероятно, для генерируемых в плазменном ускорителе вихревых колец "автоматически" обеспечивается равенство скоростей колец на бесконечности, и кольца образуют связанную систему. Подведенная к системе начальная энергия значительно больше энергии вихревых колец на бесконечном удалении. Известно [15], что чем больше начальная энергия взаимодействия колец, тем на меньшее расстояние отходят они друг от друга, что хорошо видно на соответствующих кадрах наших кинограмм.

Переднее вихревое кольцо, движущееся в реальной ультраструе, в условиях сжатия потока еще на выходе из активной зоны плазменного ускорителя, за счет вязкого взаимодействия сходящихся струйных течений, превращается в вихрь Хилла.

Построенное [5] точное решение – сферический вихрь Хилла – позволило детально анализировать явление. В работах [13, 14] исследовалась реакция сферического вихря Хилла на некоторые осесимметричные возмущения его поверхности. Установлены интересные детали поведенческих реакций вихря Хилла при таких возмущениях. Так, при незначительном растяжении сферы вдоль оси движения, то есть когда вихрь Хилла в начальный момент имеет форму вытянутого сфероида, определенная часть завихренной жидкости вытягивается в виде длинного шлейфа вниз по течению, провоцируя процесс кумулятивного выброса жидкости (см. рис. 6), тогда как основная часть массы завихренной жидкости остается в сферической форме. Но подторможенный вихрь Хилла догоняет вихревое кольцо, шедшее вторым, охватывает его и "выжимает" содержимое в шлейф, как кумулятивную струю.

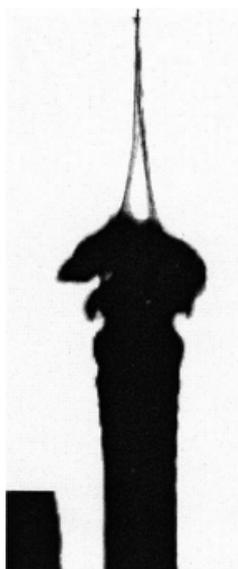


Рис. 6. Кумулятивный выброс жидкости из ультраструи при взаимодействии вихря Хилла

Если начальная форма вихря является сплюснутым сфероидом, то картина будет иной. Безвихревая жидкость будет захватываться через кормовую точку, продвигаться внутри вихря и почти достигать носовой точки. В отсутствие шлейфа кумулятивный выброс не может образоваться, а истекающая ультраструя тормозится на вихре Хилла и принимает в головной части грибообразную форму (см. рис. 7).

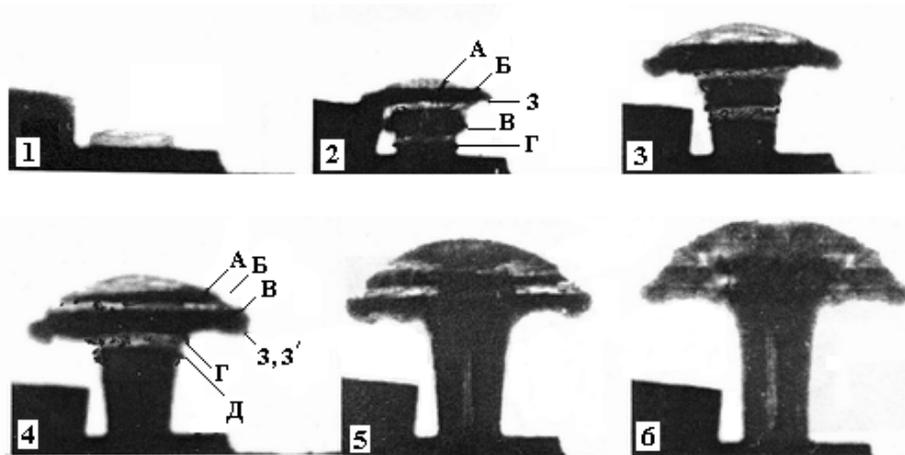


Рис. 7. Ультрасструя с кумуляцией, заторможенной на вихре Хилла

Таким образом, при экспериментальных исследованиях импульсных плазменных ускорителей, работающих в конденсированной среде, обнаружено новое, интересное явление возбуждения вихревых колец в метаемой струе, их взаимодействие между собой, с генерированием кумулятивных выбросов по оси основной ультрасструи. Подробно рассмотрен механизм возникновения необычной формы кумуляции, который в дальнейшем позволит построить теоретическую модель явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малюшевский П.П., Канивец В.В., Голубенко Ю.Г., Семко А.Н. Формирование импульсных струй жидкости при направленном электрическом разряде // Тез. докл. 6-го Всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике. 1966. С. 204.
2. Бородин В.П., Войцеховский В.В. Применение искровой съемки для исследования высоконапорных импульсных струй // Журнал ПМТФ. 1965. № 3. С. 100–102.
3. Бородин В.П. Исследование высоконапорных импульсных струй при помощи рентгенографии // Журнал ПМТФ. 1985. № 5. С. 160–162.
4. Лаврентьев М.А., Антонов Э.А., Войцеховский В.В. Вопросы теории и практики импульсных водяных струй. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1961.
5. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., 1977.
6. Сурков С.В. О каскадном характере роста турбулентных вихрей // Инж. физ. журнал. 1985. Т. 48. С. 561–568.
7. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика. М., 1964.
8. А.с. №313588 СССР, МКИ В21D 26/00. Способ получения высоких и сверхвысоких давлений / П.П. Малюшевский // Бюл. "Открытия. Изобретения". 1976. № 35. С. 135.
9. Малюшевский П.П. О механизме формирования кумулятивных струй при метании жидкости плазменным ускорителем // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1988. № 5. С. 39–44.
10. Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур. Киев, 1993.
11. Гельмгольц Г. Два исследования по гидродинамике. М., 1902.
12. Hill M.J.M. On a spherical vortex // Ibid, 1894. A 185. P. 213–245.
13. Moffatt H.K., Moore D.W. The response of Hill's spherical vortex to a small axisymmetric disturbance // J. Fluid Mech. 1978. 87, pt. 4. P. 749–760.
14. Pozrikidis C. The nonlinear instability of Hill's vorte // J. Fluid Mech. 1986. 168. P. 337–367.
15. Гуржий А.А., Константинов М.Ю., Мелешко В.В. Взаимодействие коаксиальных вихревых колец в идеальной жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1988. № 2. С. 78–84.

Поступила 28.07.04

Summary

At experimental researches of pulse plasma boosters working in a condensed medium, the new, interesting phenomenon of excitation of vortex rings in thrown jet, their interaction with the other ones, with generation of hollow-charge lets on the axis of the main ultra-spray is revealed. Qualitatively, with the usage of a phenomenon "the vortex of Hill", the mechanism of cumulation arising is considered. It will allow to develop an idealized model of the phenomenon.