

Summary

The application of the method of pulsing volt-ampere characteristics for the research of the properties of transition layers of the electric contact "metal – grease lubricant" is shown.

П.П. Малюшевский

ЯВЛЕНИЕ КУМУЛЯЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ (ЧАСТЬ I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ)

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

Согласно существующим представлениям классической гидродинамики [1] кумуляция энергии и формирование кумулятивных струй происходят при быстром (взрывообразном) захлопывании конической оболочки из вещества по нормали к поверхности внутрь на ось оболочки. В результате обжимающийся конус вещества генерирует тонкую осевую струю вещества оболочки, движущуюся с очень большой скоростью.

Эта теория полностью подтверждается на опыте в достаточно широких пределах варьирования взрывных зарядов, характеристик вещества, из которого состоит коническая оболочка, а также их форм и толщин. Однако имеются экспериментальные факты, не укладывающиеся в теорию. Например, казалось бы, выполняя угол конуса все меньше, можно получить любые сверхскоростные струи, а следовательно, в области образования струи любые сверхвысокие давления. Но обнаружен предельный угол конуса, начиная с которого скорость струи непрерывно уменьшается, а давление – падает. Оказалось, что этот предельный угол существенно определяется свойствами вещества, из которого состоит оболочка, в частности сжимаемостью.

Подробный анализ проблем взрывных струйных течений и проблем кумуляции, выполненный в работе [2], раскрывает механизм уменьшения эффекта кумуляции при изменении оптимального угла конусности $\alpha_{кр}$. При прочих равных условиях, если увеличивать угол конусности, вектор скорости метания струи отходит от оси симметрии – эффект кумуляции уменьшается, а затем возникает инверсия потока относительно обычного течения, масса струи в направлении оси существенно возрастает, скорость падает.

При исследовании классической кумуляции хорошо изучена структура течения [2]: она представляется системой из скоростной кумулятивной струи с относительно высокой удельной кинетической энергией и так называемого низкоскоростного песта, содержащего основную массу вещества исходной облицовки конической выемки.

В этом же основательном обзоре [2] большого количества работ в области проблем кумуляции и струйных течений указывается на возможность существования режима "обратной" кумуляции при схождении на оси метаемых взрывом элементов так называемых "мелких облицовок". При этом эффект "обратной" кумуляции – следствие сложной деформации с разрушением и "выворачиванием" периферии облицовки, а не ее центра. Показано, что при малых углах соударения струи возникают только в том случае, если схлопывание облицовок происходит с дозвуковой скоростью, а при переходе в зазвуковую – струя неустойчива и диспергируется на части.

Здесь же рассмотрены некоторые отличающиеся от классической кумуляции схемы и механизмы формирования кумулятивных течений. Например, при схлопывании осесимметричной цилиндрической облицовки происходит нагрев ее внутренних слоев до температуры испарения (в результа-

те необратимых потерь части кинетической энергии) и взрывообразно формируется осевая струя из испарившегося вещества. Кумуляция течения наблюдается при высокоскоростном взаимодействии плоских струй и сходящихся ударных волн [3].

В.К. Кедринским [2] обнаружен и исследован широкий класс струйных течений при анализе вертикальных султанов на свободной поверхности жидкости при подводных взрывах. Им развита предложенная М.А. Лаврентьевым физическая модель процесса: ударная волна от взрыва формирует на свободной поверхности кумулятивную выемку, а расширяющаяся взрывная полость создает поле скоростей, ортогональное ее поверхности. Затекание выемки приводит к развитию кумулятивной струи. В.К. Кедринским доказано, что основу структуры вертикального выброса для глубин взрыва $h < R_{\max}$ составляет струйный тандем, первая струя которого формируется в результате инерциального движения слоя жидкости над взрывной полостью после возникновения у нее отрицательных радиальных ускорений, вторая – в результате замыкания открытой каверны, образовавшейся после разгерметизации взрывной полости. При глубинах взрыва порядка R_{\max} вертикальные султаны исчезают, но на стадии захлопывания взрывная полость формирует вертикальную кумулятивную струю, направленную от свободной поверхности в глубь жидкости. И наконец В.К. Кедринским с сотрудниками показано, что существует другой тип вертикальных султанов, развивающихся при взрыве кольцевых зарядов из детонационного шнура вблизи свободной поверхности, когда взрывная полость по мере всплытия трансформируется в устойчивый тор с продуктами детонации, пульсация которого и может привести к указанному эффекту [2].

В природе, однако, существуют высокоскоростные струйные течения, которые не находят объяснения в рамках классической кумуляции во всех рассмотренных вариантах.

При изучении импульсных плазменных ускорителей, работающих в конденсированной среде, автором отмечен ряд особенностей и, в частности, струйных течений жидкости за пределами активной разрядной зоны ускорителя. Одной из них является генерирование кумулятивных струй жидкости на фоне ультраструй, истекающих (метаемых) при каждом электрическом разряде в активной зоне ускорителя [15].

Характерная морфология струйного течения жидкости, генерируемого при электрическом взрыве в плазменном ускорителе, представлена на кадре кинограммы (рис. 1), где видны: ультраструя 1, кумулятивная струя 2, взаимодействующие вихревые кольца А-Б, пелена 3 (движущаяся в противоположную кумулятивной струе сторону), а также "играющие" вихревые кольца В-Г-Д. Основной вопрос каков физический механизм генерирования кумулятивной струи, поскольку ее появление здесь не предсказывает теория классической кумуляции.

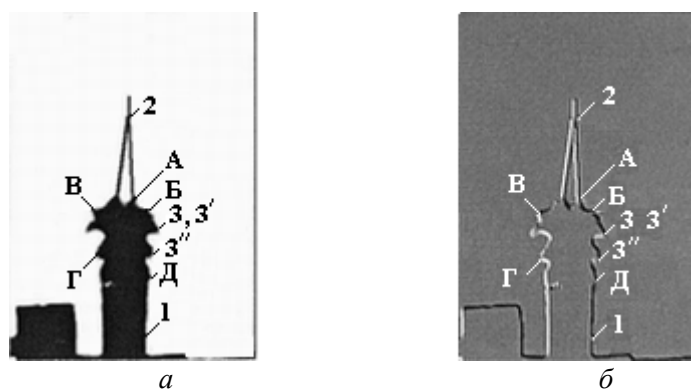


Рис. 1. Сложная морфология импульсной струи воды, выбрасываемой из плазменного ускорителя при электрическом взрыве в нем: а – прямая высокоскоростная съемка; б – обработка кадра регистрограммы струи с использованием фильтра *Bas relief-Sculpt* с целью установления ее сплошности

Здесь вероятно большая роль вихревых колец жидкости, выносимых из активной электроразрядной зоны ускорителя ультраструей и взаимодействующих между собой в условиях быстрого движения сквозь неподвижный воздух. При проходе догоняющего вихревого кольца сквозь впереди идущего происходит потеря их устойчивости и разрушение с характерным выносом вещества внутреннего вихревого кольца в виде высокоскоростной, тонкой, коллинеарной кумулятивной струи по направлению общего поступательного движения вихревых колец в ультраструе с одновременным отбрасыванием вещества внешнего вихревого кольца в противоположную сторону в виде коаксиальной пелены, кольцевой группы струй или компенсирующей массивной струи с меньшей скоростью. Обнаружение вихревой кумуляции в прямых физических экспериментах подтверждает ее реальность.

Научное значение установленных физических явлений состоит в том, что оно должно стимулировать новое развитие известного научного направления в гидродинамике – устойчивость взаимодействующих вихревых колец, и положить начало новому научному направлению – вихревой кумуляции, а также внести существенные изменения о природе и свойствах вихревых движений.

Следует отметить, что вихревые кольцевые структуры широко распространены во Вселенной и участвуют в глобальных процессах рождения и развития галактик [4–7]. Особенно интересные наблюдения сделаны в конце прошлого столетия:

– в результате анализа [8] радиоизображения галактики Геркулес А установлено, что ее активное ядро выбрасывает в двух противоположных направлениях гигантские струи вещества со своеобразной морфологией: западная струя перемещается в группе повторяющихся колец, постепенно расширяющихся с расстоянием, а восточная – имеет осциллирующую форму из трех разнояркостных зон и на ее конце есть "завитки" (это различие в струях и сам механизм их образования пока не находят объяснения [14]); аналогичные струи обнаружены у многих радиогалактик и К 30 [8];

– с применением сравнительно новой методики TAURUS выполнены исследования галактики с двумя взаимодействующими кольцевыми структурами в Парусах (1008-3814) [7] и установлено, что с использованием существующих теорий пока трудно объяснить наблюдаемую анизотропию скоростей во внешнем кольце, предполагая только его вращение и симметричное расширение;

– веретенообразное "тело" галактик UGC 7578 и II Zw 73 охватывается группой вращающихся вихревых структур [10], причем галактики имеют аномально высокое отношение полной водородной массы к оптической светимости, а для колец это отношение еще больше аномально;

– в скоплении галактик Abell 1631 найдена новая кольцевая галактика, взаимодействующая с другой галактикой [11]; такие же взаимодействующие кольцевые галактические структуры UGC 6697, быстро движущиеся через межгалактический газ, обнаружены в скоплении галактик Abell 1367 [12];

– вблизи ядра галактики NGC 1097 наблюдается яркий кольцеобразный источник [13], совпадающий с кольцом оптически горячих пятен;

– предполагается, что гигантские вихревые кольца образуются при аккрекции вещества на сверхмассивную черную дыру [4].

Известны также сообщения о "курящих" галактиках и другие сведения о вихревых движениях взаимодействующего вещества во Вселенной.

Вихревые кольцевые в сочетании со струйными структурами широко распространены также в земной атмосфере и гидросфере: мощные кумулятивные выбросы воздуха при развитии конвективных облаков (например, зарегистрированные над Южно-Китайским морем на рис. 2), гигантские выбросы газов, пыли и пепла некоторых вулканических извержений на громадную (до 13 км) высоту, выбросы некоторых гейзеров, шаровая и четочная молнии, импульсные струи головоногих моллюсков, газо-пылевые структуры, образующиеся и вертикально поднимающиеся в атмосфере при ядерных взрывах и мощных взрывах химических взрывчатых веществ и др.

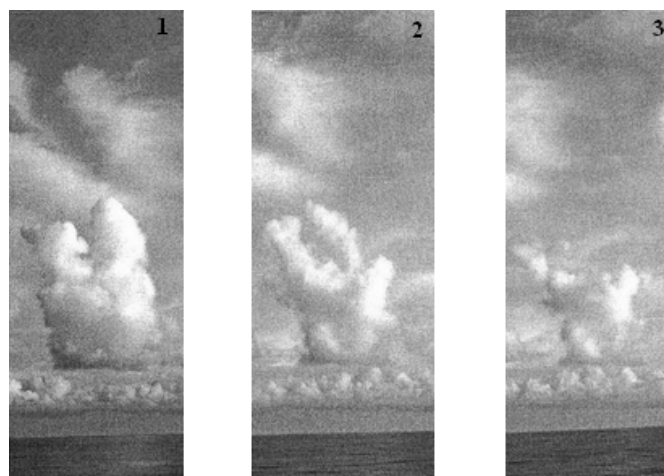


Рис. 2. Взаимодействие вихревых структур в локальных восходящих потоках воздуха. Хорошо видны, визуализированные сконденсированным паром, выбросы струй из зоны взаимодействия вихревых колец. (Снимки 1-3 сделаны с интервалами 10 минут при удалении судна от облака со скоростью ~ 12 узлов)

Дальнейшие лабораторные исследования кумулятивных эффектов, возникающих при взаимодействии вихревых колец вещества, могут способствовать решению ряда задач прикладного характера.

Формирование в струях жидкости взаимодействующих вихревых колец метаемых плазменным ускорителем, подробно описано в работе [15] и там же предложен гипотетический механизм возбуждения зарождения и развития кумулятивных выбросов из ультраструй. Однако предпосылки этого предложения пока подробно не проанализированы.

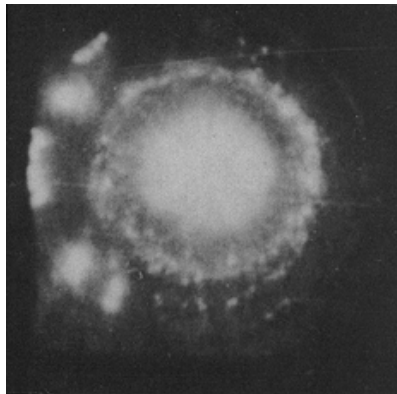


Рис. 3. Замкнутое плазменное образование, сформированное у торца проходного изолятора плазменного ускорителя

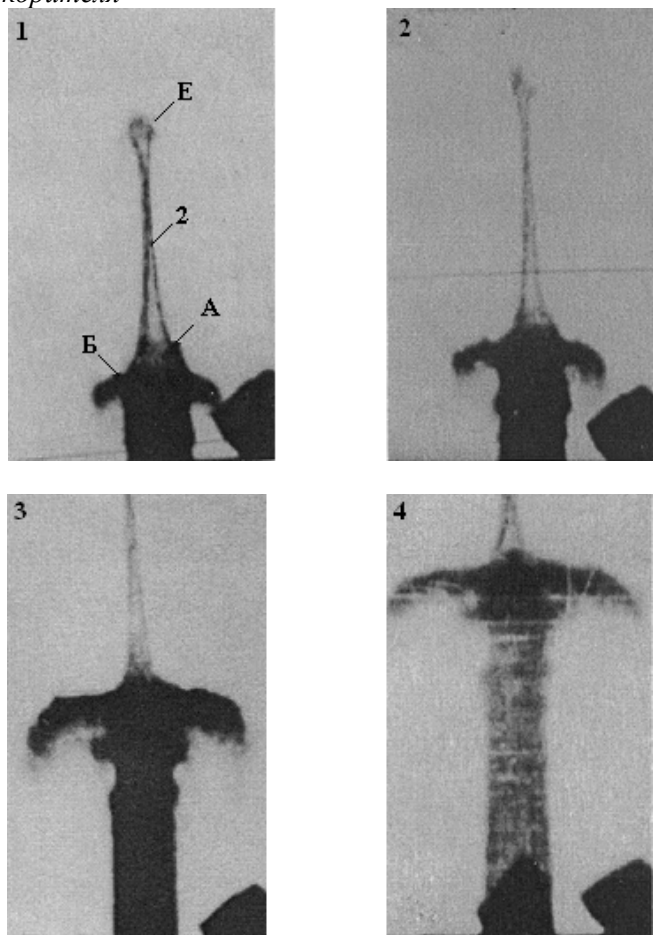


Рис. 4. Генерирование кумулятивной струи из водяной ультраструи при взаимодействии в ней вихревых колец. Виден остаточный вихрь на кончике кумулятивной струи. (Затемнение ультраструи на кадрах 1-3 вызвано развитой кавитацией в ней, с ослаблением кавитации струя просветляется – кадр 4)

При формировании кольцевого плазменного образования у внутреннего торца проходного изолятора (см. рис. 3) в активной зоне плазменного ускорителя начинается развитие движения его плазмы и на выход из активной зоны, под действием которого формируются импульсные ультраструи сложной структуры (см. рис. 1, 4, 4,a). Примерно через 70 мкс после зажигания разряда регистрируется начало истечения воды за пределы ускорителя в виде компактной ультраструи 1 диаметром d_s , равным диаметру сопла (торцевого отверстия). На участке пути вдоль оси ультраструи, существенно меньшем ее диаметра, голова струи теряет устойчивость, приобретая форму вихревого кольца (А, Б), а по оси быстро развивается кумулятивная струя 2 диаметром у основания (примерно в

плоскости раздела с основной струей) $d_p \approx 0,1d_s$. Струя имеет хорошо выраженную форму – сходится в острие, на котором зачастую "сидит" разваливающееся вихревое кольцо, образующее те самые "завитки" (см. рис. 4, Е). Оно движется вместе с кумулятивной частью струи 2, как бы вытягивая ее и постепенно теряя свое вещество в виде облака мельчайших брызг (создавая едва заметное туманное образование), сохраняющее некоторое время все признаки вихревого движения. Голова ультраструи 1 замыкается крупным распадающимся в пелену 3 вихревым кольцом Б, взаимодействующим с проходящим сквозь него вихревым кольцом А, под которым видны взаимно перемещающиеся, "играющие" вихревые кольца третьего, четвертого и т.д. порядка (В, Г, Д, ...). Здесь ультраструя и кумулятивная струя сохраняют компактность и имеют дозвуковую $V_1 = 118$ м/с и сверхзвуковую $V_2 = 370$ м/с скорости соответственно. В соответствии с законом сохранения импульса, пелена 3 движется противоположно движению кумулятивной струи 2. Как правило, количество вихревых колец соответствует числу полупериодов разрядного тока (см. рис. 5), что имеет физический смысл, пояснения которому даны ниже.

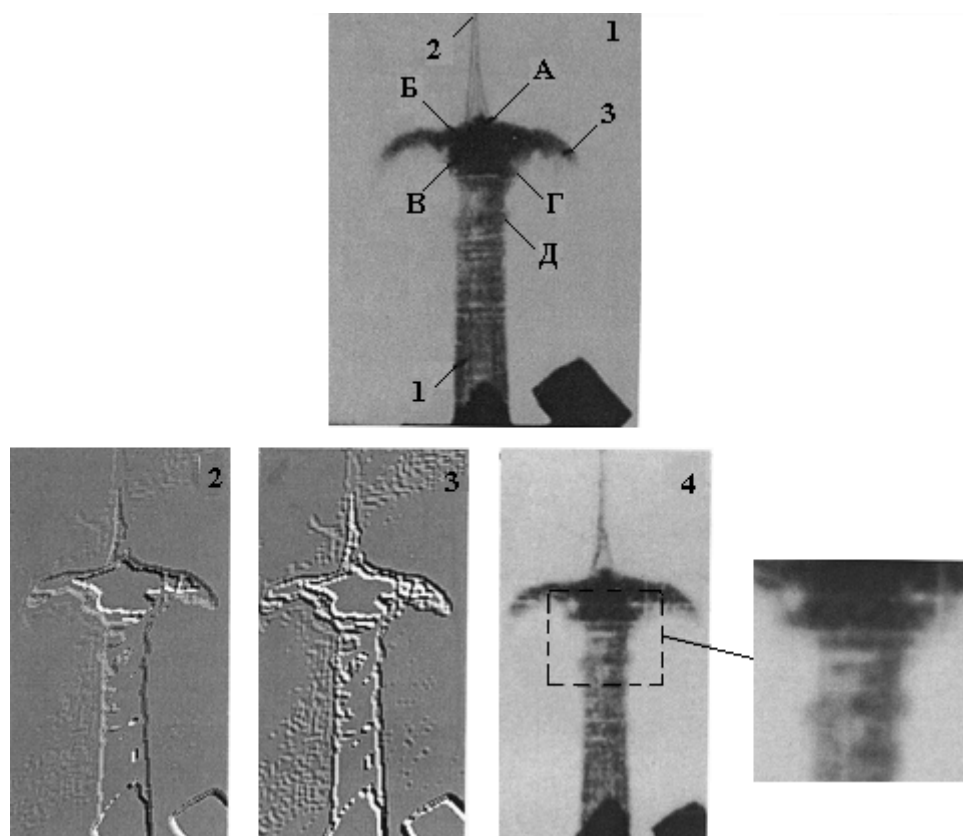


Рис. 4,а. Морфология кумулирующей ультраструи с вихревыми кольцами в завершающей фазе истечения (кадр 1). Сплошность струи и кавитационные области в ней подтверждаются анализом с использованием фильтров Edge-Laplas; Bas relife-Sculpt

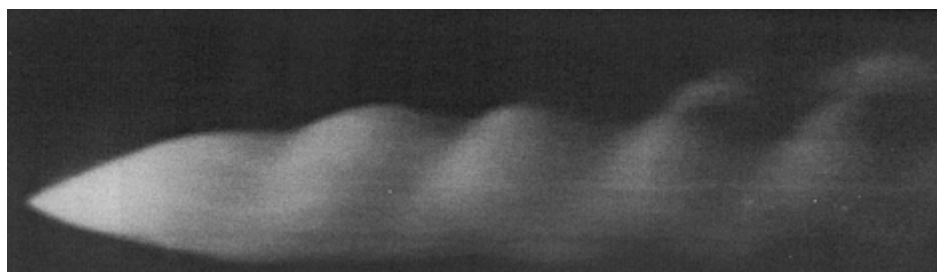


Рис. 5. Пульсация свечения плазменного образования в плазменном ускорителе. Число пульсаций соответствует числу эффективных полупериодов разрядного тока

На рис. 6 динамика развития кумуляции и истечения ультраструй значительно отличается от соответствующей режимам истечения импульсных струй (рис. 1). Отличие в том, что теряют устойчивость и разрушаются не пара вихрей, а больше, а это несколько уменьшает скорость кумулятивной

струи 2 ($V_2 = 330$ м/с), но увеличивает скорость ультраструи 1 ($V_1 = 165$ м/с). Общее количество генерируемых вихревых колец в ультраструе увеличивается.

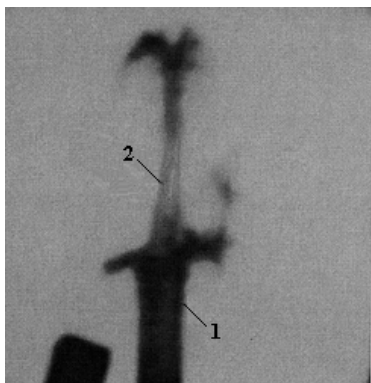


Рис. 6. Истечение из плазменного ускорителя импульсной струи со слабо развитой кумуляцией

На рис. 7 динамика истечения ультраструи 1 еще больше отличается от динамики, соответствующей режимам истечения, представленным выше. Здесь полностью отсутствует кумулятивная струя, вихревых колец значительно больше, причем они весьма интенсивно взаимодействуют практически сразу все, мешая развитию осевой кумуляции, а теряя устойчивость разрушаются, разбрасывая вещество совершенно необычно – по направлению, перпендикулярному перемещению ультраструи, что может происходить только при интенсивном вихревом движении. При этом взаимодействие происходит в голове ультраструи 1, которая как бы под тормаживается (через 250 мкс после начала истечения скорость $V_1 = 170$ м/с резко падает до $V_1 \approx 110$ м/с) и принимает форму обратного конуса. В основании этого конуса – головы струи образуется зона завихренности, близкая к шаровидной, препятствующая образованию кумулятивной струи. Более подробно подобная ситуация проанализирована во второй части статьи.

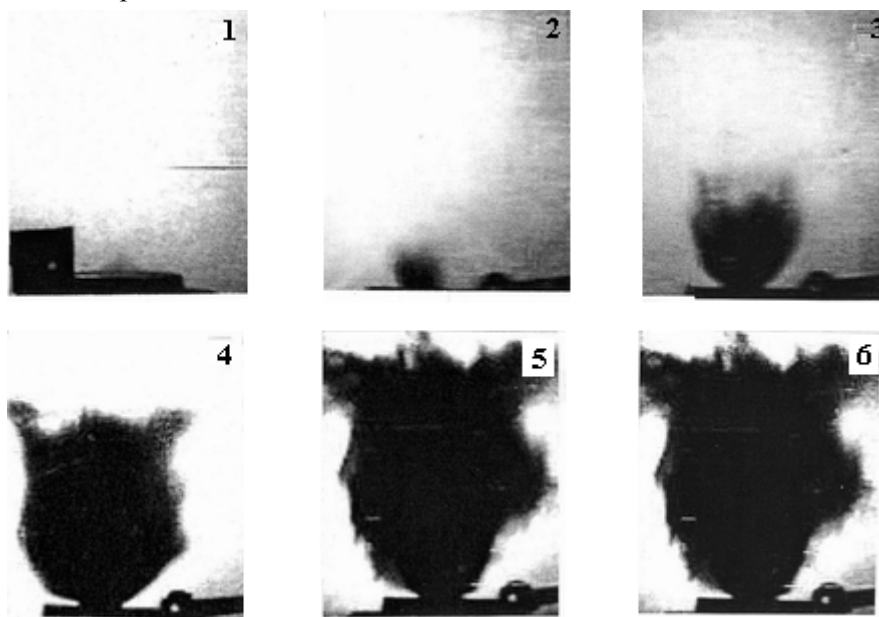


Рис. 7. Истечение из плазменного ускорителя импульсной струи воды в режиме не способствующем возникновению кумулятивного выброса

Описанные три режима истечения импульсных ультраструй различаются только величиной рабочего напряжения разряда U_0 при $W_0 = \text{const}$. А это значит, что емкость во внешнем разрядном контуре уменьшается в несколько раз при переходе от малых значений U_0 к большим. Следовательно, длительность полупериода разряда $\tau = \pi\sqrt{L \cdot C}$ также уменьшается. Это имеет существенное значение, поскольку связано с физическим механизмом генерирования и взаимодействия вихревых колец, как показано ниже.

Применение согласующего кабельного трансформатора позволяет осуществлять разряды, близкие к апериодическим (в рассматриваемом случае разрядный ток "укладывался" в два полупериода), оптимизировать выделение энергии в плазменное образование. Все это резко изменяет морфологию истечения импульсных струй: кумулятивная струя (рис. 8) получается сдвоенной (двух-

ступенчатой), состоящей из двух участков – головного 2, движущегося со скоростью $V_2 = 715$ м/с и компенсирующего 2' (подторможенного взаимодействующими вихревыми кольцами, заметными по небольшой пелене 3) со скоростью $V_{2'} = 450$ м/с. Ультраструя 1 движется со скоростью $V_1 \approx 155$ м/с.

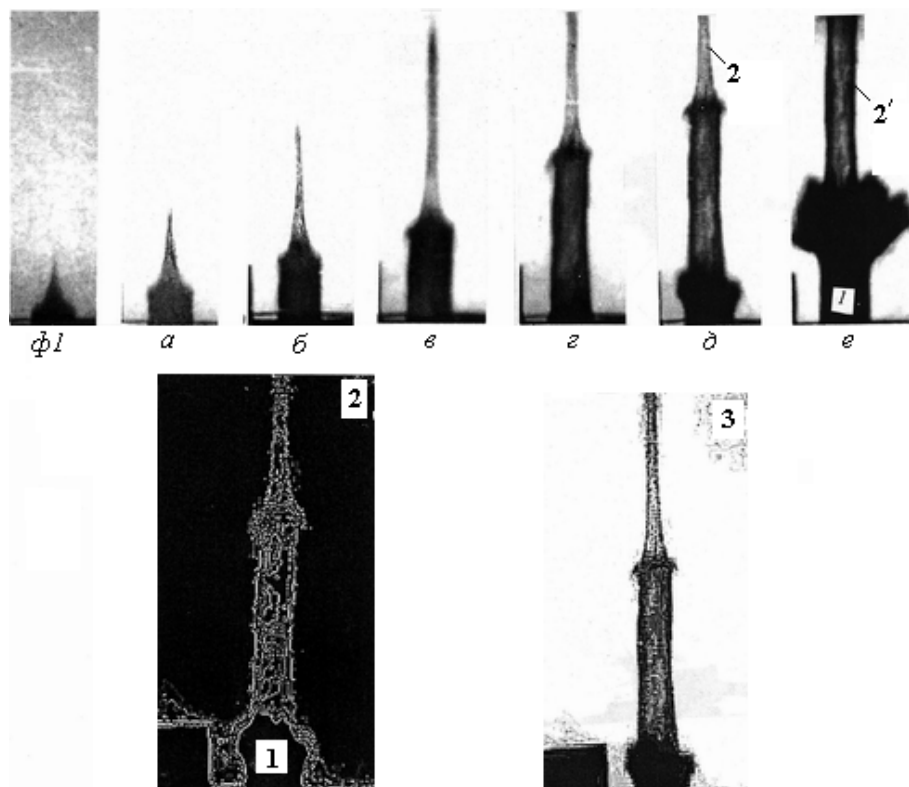


Рис. 8. Истечение из плазменного ускорителя импульсной струи воды при согласованном электрическом разряде. (Анализ структуры струи с использованием фильтров Edge-Laplas, а также Bas relief-Sculpt на кадрах 2 и 3, подтверждают наличие в ней кавитации за счет падения в струях давления при увеличении скорости. В голове ультраструи 1 кавитации порождается при взаимодействии вихревых колец)

При увеличении энергии, вводимой в разряд ($W_0 = 25$ кДж), и одновременном уменьшении индуктивности разрядного контура (от $L = 3,65$ к $0,3$ мкГн) резко увеличивается скорость и ультраструй $V_1 = 500$ и 750 м/с, и кумулятивных струй $V_2 = 1529$ и 1760 м/с (рис. 9), но вихревые движения в голове ультраструи сохраняются.

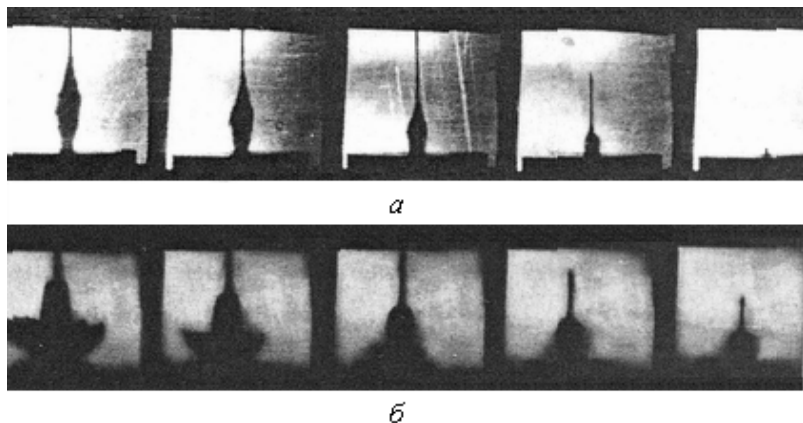


Рис. 9. Кумулятивные выбросы со скоростью 1500 м/с (а) и 1710 м/с (б) при увеличении энергии в импульсе в 5–7 раз с одновременным уменьшением индуктивности разрядного контура в 12 раз

Вихревое движение при истечении вещества из плазменного ускорителя хорошо регистрируется (см. рис. 9) при замене воды смесью воздуха с водяным паром (разряд инициировался по поверхности тонкого слоя воды глубиной около $0,5$ см на проходном изоляторе плазменного ускорителя), хотя вязкость газа, а затем – плазмы, существенно меньше вязкости воды. Эти anomalно долго существующие плазменные вихревые кольца генерируются аналогично [16], и здесь важную роль играет вязкость струи [17], поскольку радиальный разлет их вещества практически отсутствует. Для

различных режимов истечения эти плазменные вихри существуют от 10 до 100 мс, хотя разряд конденсатора полностью завершается за 50–120 мкс, то есть энергия из разрядного контура, поддерживающая температуру светящейся плазмы, в кольцевой вихрь, казалось бы, не поступает (см. рис. 10).

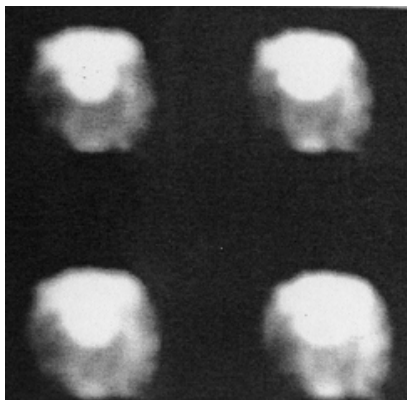


Рис. 10. Выброс аномально долго живущего плазменного вихревого кольца из плазменного ускорителя при быстром разряде в нем

Таким образом, высокоэнергетичные плазменные ускорители, работающие в конденсированной среде, формируют и выбрасывают весьма необычные, содержащие кольцевые вихри, сложные по структуре, разноскоростные в одном выбросе струи жидкости. Такое явление требует анализа и объяснения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., 1977.
2. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва // Журнал ПМТФ. 1987. № 4. С. 23–48.
3. Альтиулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // Журнал УФН. 1985. 85. Вып. 2. С. 197–258.
4. Норликар Дж. Неистовая Вселенная. М., 1985.
5. Спитцер Л. Пространство между звездами. М., 1986.
6. Каплан С.А., Пикельнер С.Б. Физика межзвездной среды. М., 1979.
7. Храмов Г.С. Планетарные туманности. Физика, эволюция, космогония. М., 1985.
8. Henbest N. Rings and wiggle jets tell more about radio galaxies // New Sci. 1984. 101. N 1402. P. 22–30.
9. Taylor K., Atherton P.D. TAURUS' observations of the ring galaxy in Veia // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1984. 208. N 3. P. 601–608.
10. Schecher P.L., Sancisi R., H. van Woerden, Lynds C.R. The spindlelike galaxies UGC 7576 and II Zw 73 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1984. 208. N 1. P. 111–121.
11. Wakamatau K.-I. A new ring galaxy in the Abell 1631 cluster galaxies // Publ. Astron. Soc. Pacif. 1983. 95. N567. P. 293–295.
12. Gavazzi C., Tarengi M., Jaffe W., Butker H., Boksenberg A. Radio and optical investigation of UGC 6697 in Abell 1367 // Sci. Prep. Eur. South. Observ. 1984. N 328. P. 38–45.
13. Tully R.B., Wolsteneraft R.D., Perly R.A. VLA observations of the optical jest and nucleus of NGC 1097 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1984. 207. N 4. P. 889–896.
14. Dreher J.W., Feigelson E.D. Rings and wiggles in Hercules A. // Nature. 1984. 308. N 5954. P. 43–45.
15. 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.
16. Райзер Ю.П., Силантьев А.Ю., Суржиков С.В. Дозвуковое вихревое движение газа в условиях интенсивного энерговыделения в оптическом плазмотроне // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 12. № 3. С. 134–138.
17. 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. Механика жидкости и газа. 1986. № 3. С. 25–38.

Поступила 28.07.04

Summary

The outcomes of experimental researches of process of obtaining hollow-charge water jets at electric discharge in a plasma booster are shown. High energy plasma boosters working in a condensed medium, re-shape and reject rather exotic, keeping ring vortexes, fluid jets. These jets are composite on frame and have components of a cumulation. Such phenomenon demands the analysis and explanation.