

## ВЛИЯНИЕ СВОБОДНЫХ, ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА КАВИТАЦИОННУЮ ОБЛАСТЬ, ВОЗБУЖДАЕМУЮ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПОДВОДНЫМИ РАЗРЯДАМИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, [iipt@iipt.com.ua](mailto:iipt@iipt.com.ua)*

Ранее нами была описана электроразрядная нелинейная, объёмная кавитация (ЭРНОК) [1–3], которая используется для обработки малоразмерных твёрдых и жидких частиц в электровзрывных технологических реакторах. ЭРНОК обычно развивается в придонной части реакторов, на которую и осуществляются параллельные электрические разряды. То есть значительная часть рабочего объёма реактора остаётся не активированной. Чтобы увеличить эффективность преобразования энергии кавитационной области в механохимическую и, как следствие, производительность процесса обработки частиц вещества, следует отыскать путь увеличения объёма кавитационной области. Это можно сделать, например, за счет распространения её по высоте реактора, используя влияние отражающих поверхностей в реакторе.

В работе [4] показано, что на протекание процесса подводного электрического взрыва большое влияние оказывает диаметр рабочей камеры, особенно когда этот диаметр соизмерим с диаметром послеразрядной полости.

Предполагалось, что, комбинируя взаиморасположение отражающих поверхностей в реакторе, можно добиться целенаправленного изменения путей движения гидротоков в зоне генезиса кавитационной области, в том числе в вертикальном направлении.

После того как электрическая энергия заряженного конденсатора полностью выделится на элементах разрядной цепи, канал электрического разряда превратится в послеразрядную полость (ПП), совершающую ряд последовательных пульсаций. Пульсации сопровождаются акустическим излучением и формированием нестационарных гидротоков [5].

Максимальный радиус и период колебаний ПП увеличиваются с увеличением мощности электрического взрыва, уменьшаются при увеличении внешнего давления; ПП изменяет форму при наличии отражающих поверхностей. В момент минимума послеразрядной полости благодаря интенсивному сжатию испускается импульс давления, который уносит некоторую часть энергии ПП.

Но более важным фактором, действующим вблизи минимума послеразрядной полости, оказывается тейлоровская неустойчивость граничной поверхности ПП [6]. Она создаёт сильную турбулентность около коллапсирующей ПП (за счет её энергии) и является причиной того, что сильно искажается гидродинамическое поле струи захлопывания. Кроме того, капли воды проникают в ПП, охлаждая её и вызывая конденсацию паровой атмосферы и, как следствие, локальное уменьшение скорости стенок ПП. Следует заметить, что при максимумах ПП количество движения в вертикальном направлении распределено в большом объёме воды, тогда как при минимумах ПП это количество движения сконцентрировано в относительно малой области; поэтому большая часть количества движения в вертикальном направлении имеет место вблизи минимумов ПП.

Для мощных подводных взрывов характерным также является всплытие взрывной полости как единого целого, но маломощные электрические взрывы практически не всплывают как единое целое, а могут лишь существенно изменить свою форму. Достаточно значительное влияние силы тяжести может складываться с подтормаживающими силами у отражающих поверхностей, и ПП изменит полусферическую форму на тороидальную, а значит, сможет изменить перераспределение гидротоков в пользу вертикального осевого.

**Основные методические положения.** Была поставлена серия сравнительных экспериментов в электроразрядных камерах со стенками из листовой нержавеющей стали толщиной 5 мм, имевшими прозрачные иллюминаторы из оргстекла. Через них осуществлялись наблюдение и кинорегистрация развития разрядов и кавитационной области. Размеры внутреннего пространства разрядных камер: №1 – более широкая (на 10 мм), чем расчетные размеры ПП, –  $240 \times 240 \times 240$  мм<sup>3</sup>; №2 – более узкая (на

10 мм), чем расчетные размеры ПП, – 220×220×240 мм. Камеры снабжались парой параллельных электродных систем (рабочая свободная часть которых выполнялась из титановой упругой проволоки диаметром 3 мм), установленных друг от друга на расстоянии  $R=115$  мм, – расчетный [5] максимальный радиус послеразрядной полости, для выбранных параметров разрядного контура:  $U_0=25$  кВ;  $C=1$  мкФ;  $l_p=10$  мм. В данной серии экспериментов с целью визуализации гидропотокосов рабочая свободная часть каждого электрода выполнялась из сдвоенных проволочных стержней. Следует отметить, что вышеприведенные параметры разрядного контура в точности соответствовали подобным в нашей предшествующей работе [3].

Процесс развития подводного электрического разряда и послеразрядных явлений в реакторе регистрировался модернизированной высокоскоростной установкой ВФУ-2. Она настраивалась так, что давала возможность получить кинограмму (режим «лупа времени»), захватывающую все три стадии разряда и простирающуюся ещё в далёкую послеразрядную стадию. Собственно, в этой стадии генерируется и развивается электроразрядная кавитация. Общая длительность каждой отдельной кинограммы равнялась 10–20 мс, причем наблюдаемый генезис кавитационных областей составлял 40–50% этого времени. Полученные в таком временном режиме кинограммы выводились на экран компьютерного монитора. Здесь они обрабатывались так: производились линейные измерения гидродинамических возмущений с учетом видимых в кадре деталей электродных систем; рассчитывались изменения локальных скоростей возмущений от кадра к кадру; анализировалась общая динамика генезиса кавитационной области.

Реактор заполнялся водопроводной водой, отстоявшейся не менее 5 суток для стабилизации её газосодержания и выравнивания в ней количества зародышей кавитации. Температура воды в реакторе поддерживалась в интервале 20–21°C. Заглубление разрядов  $H$  устанавливалось  $15l_p$ , то есть ~150 мм. Эффективность ввода энергии в канал электрического разряда составляла от 50 до 55% , что контролировалось осциллографированием изменений тока и напряжения в разрядном контуре. В целом методика исследований импульсных гидродинамических и электродинамических явлений, как и в нашей работе [3], соответствовала предложенной В.В. Шамко в работе [7].

Наконец, в качестве контрольного метода оценки интенсивности кавитации был использован йодометрический метод [8], дополняющий фотографический. Он позволял количественно определять концентрацию химически активных частиц - окислителей, образующихся из молекул воды при схлопывании кавитационных пузырьков.

Согласно ранее проведенным исследованиям электроразрядная кавитация в водных растворах приводит к появлению химически активных частиц, проявляющих высокую окислительную и восстановительную способность ( $\text{OH}^\bullet$ ,  $\text{H}^\bullet$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{HO}_2$  и др.). Причем количество образующихся активных частиц прямо пропорционально интенсивности кавитационного процесса.

Конкретно метод был основан на окислении водных растворов йодида калия (KI) до свободного йода ( $\text{I}_2$ ) под действием основных факторов подводных электрических разрядов, трансформированных в электроразрядную кавитацию. Содержание йода определяли титрованием раствором тиосульфата натрия в присутствии крахмала.

**Результаты исследований и их обсуждение.** На рис. 1 представлены кинограммы развития разрядов и послеразрядных явлений в разрядном промежутке одного из двух параллельных электродов. Экспозиция каждого кадра ~ 0,32 мс, порядок следования – снизу вверх и слева направо. В область второго электрода устанавливалась (с помощью паза на дальней стенке) под прямым углом к плоскому дну контрольная стальная упругая полупластина (см. рис.1,*a*) как граница со «свободным скольжением». Её расстояние от  $l_p$  задействованной электродной системы составляло 75 мм, то есть было сравнимым с «размерами явления» (радиусом послеразрядной полости). Высота пластины – 120 мм, толщина – 5 мм.

Как видно из рис. 1,*a* (временной интервал между кадрами составляет 0,32 мс), после пробоя (полностью засвеченный кадр) разрядного промежутка ударная волна сферической симметрии, а за ней и гидропоток через 0,32 мс достигают основания полупластины. Здесь гидропоток частично отражается, частично проходит сквозь полупластину, возбуждая в ней собственные колебания. За полупластинкой на стороне, противоположной электровзрыву, к 0,64 мс появляются продавленные и выброшенные волнами сжатия из-под основания полупластины струйки жидкости – часть гидропотока. Через 2,56 мс гидропоток, огибая верхнюю кромку полупластины, возбуждает вихреобразование на ней (вихрь хорошо заметен на верхнем внешнем угловом срезе). К 7,04 мс нижний струйный выброс растворяется в окружающей жидкости, а вихрь продолжает жить у вибрирующей («звнящей») верхней кромки полупластины. Ещё через 0,32 мс вихрь тоже гаснет, хотя верхняя кромка полупластины продолжает вибрировать.

Главные же события, свидетельствующие о влиянии свободной упругой поверхности на развитие разрядных явлений, разворачиваются приблизительно с 6,4 мс. Хорошо видно, что ПП начинает терять правильную полусферическую форму – её левая четверть вначале в придонной части, а затем и по всей высоте устремляется к полупластине. Возникает сильное турбулентное движение жидкости (это видно по взаимным перемещениям стержней электродов – они то расходятся, то сходятся), резко уменьшается ее прозрачность. Несколько снижая ПП, уже как единое целое, быстро устремляется в угол, образованный полуплоскостью и дном реактора, и оказывается в нём к 8,96 мс. Здесь она сосредоточивается, разворачивает вектор движения и устремляется вверх вдоль полуплоскости. Так она движется ещё около 7,04 мс, постепенно теряя скорость, и более не наблюдается, так как уходит за пределы разрешения киносъёмки данного эпизода.

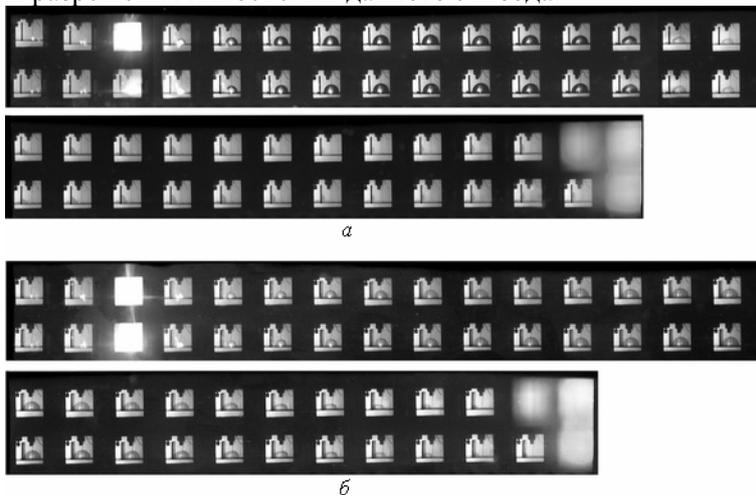


Рис. 1. Развитие разрядов и послеразрядных явлений в разрядном промежутке при наличии упругой (а) и жесткой (б) пластин в области одного из электродов

Таким образом, упругая полуплоскость, размещенная на определенном расстоянии от разрядного промежутка одной из пары электродов, сильно влияет на развитие и векторы движения электроразрядных гидротоков.

Для оценки влияния упругости полуплоскости на движение электроразрядных гидротоков к вышеописанной стальной полуплоскости была приклеена пластина из оргстекла с размерами, строго соответствующими ей (см. рис. 1,б). Параметры подводного разряда были те же, что и для вышеописанного эксперимента.

Кинограмма зафиксировала существенное увеличение скорости развития гидродинамических процессов (для кинограммы на рис. 1,б межкадровый интервал составляет 0,192 мс). Здесь практически не заметны протечки под полуплоскостью и отсутствует вихреобразование у верхней кромки полуплоскости, хотя вибрация («звон») примерно с 2,3 мс слабо, но проявляется. Послеразрядная полость сразу же после возникновения устремляется к полупластине как единое целое (это видно по углу наклона к полуплоскости тонкого стержня электрода), через 8,064 мс сосредоточивается в углу, образованном пластиной и дном. Ещё через ~ 0,77 мс полностью исчезает, не влияя на поворот вектора скорости гидротоков на 90°. Возможно, это самое важное – в данном случае совсем не проявляется турбулентность гидротоков. Значит, влияние величины упругости полуплоскости на развитие послеразрядных гидродинамических процессов очень существенное.

Возможно, здесь какую-то заметную роль сыграла чистота поверхности полуплоскости (гладкое оргстекло в отличие от стали с необработанной поверхностью).

Для ответа на этот вопрос был подготовлен и поставлен эксперимент с параллельными разрядами при полном отсутствии каких-либо реально отражающих поверхностей как по сторонам, так и сверху снизу (см. рис. 2). Временной интервал между кадрами составлял 0,192 мс.

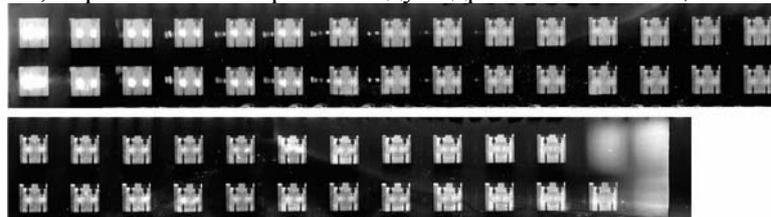


Рис. 2. Развитие разрядов и послеразрядных явлений в разрядном промежутке при отсутствии реально отражающих поверхностей

Разряды (с параметрами разрядных контуров, соответствующими вышеописанным) осуществлялись в параллельных электродных системах с геометрией разрядных промежутков «остриё – остриё», которые инициировались тонкими ( $d = 0,025$  мм) медными проволочками. Ближайшие плоские отражающие поверхности находились на расстоянии  $L \geq 3R$  (то есть значительно большем «размеров явления») от границ разрядных промежутков, так что разряды можно было считать свободными, не испытывающими влияния таких поверхностей.

После осуществления синхронных разрядов послеразрядные полости быстро растут и к  $\sim 2,69$  мс начинают сталкиваться. При этом ПП не сливаются, а, как бы упираясь друг в друга, продолжают расти, взаимно деформируясь вплоть до  $\sim 8,06$  мс, затем вдруг скачкообразно, парадоксальным образом уменьшаясь в размерах точно до расстояния между электродами, соединяются как бы в единую послеразрядную полость. Последняя уже через  $\sim 0,4$  мс захлопывается, не вызывая никаких заметных в эксперименте кавитационных явлений.

Вернемся к рассмотрению параллельных электрических разрядов под водой в исследуемых реакторах различной геометрии внутреннего пространства. На рис. 3,а,б представлена динамика образования и развития послеразрядных кавитационных областей в электроразрядных реакторах с параллельными разрядами: а – реактор №1, б – реактор №2.

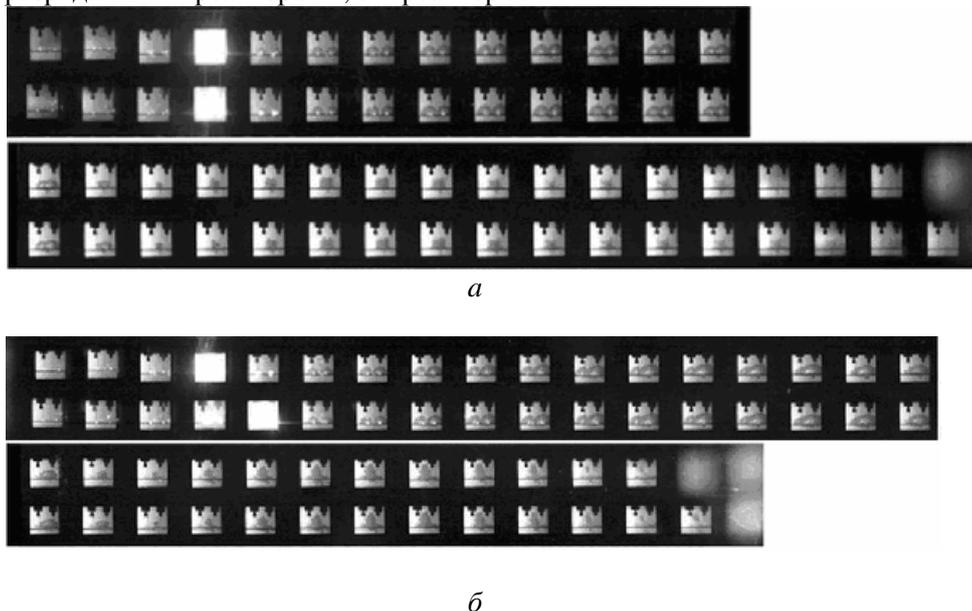


Рис. 3. Разряд и послеразрядные явления в разрядных промежутках реакторов различной геометрии: а – реактор №1; б – реактор № 2

Кинограммы, представленные на рис. 3,а и б, рассмотрим покадрово в единой временной привязке к моменту электрического пробоя разрядных промежутков. Так удобнее заметить различия в гидродинамике потоков и поведении кавитационных областей.

С момента возникновения электрического пробоя разрядных промежутков (нулевой момент), зафиксированных и а-кинограммой, и б-кинограммой, через примерно 7,68 мс для а – процесса и 9,6 мс для б – процесса синхронно возбужденные послеразрядные полусферы захлопываются. То есть б - процесс в этой стадии электровзрыва оказался на 25% длительнее (то есть медленнее) а - процесса в этой же стадии. Влияние границ электроразрядного реактора – дна и стенок - состоит в увеличении периода колебаний ПП. Однако следующая за стадией захлопывания послеразрядных полостей стадия возбуждения, развития и угасания кавитационной области, напротив, значительно короче (на 40%), то есть быстрее для б - процесса. По нашему мнению, этот парадокс обеспечивается сильным взаимодействием ПП со стенками разрядной камеры №2, хорошим подтормаживанием периферийного гидротока, что приводит к возбуждению пары взаимодействующих кольцевых вихрей (хорошо видных в придонной части кавитационной области, и примерно на 2/3 её высоты). Механизм их возникновения следующий.

Сначала расширение ПП является, по существу, радиальным и раздельным, но после достижения обеими ПП максимума 7,68 мс (для электроразрядного реактора с размерами, близкими к размерам реактора) раздельные ПП сливаются в единую ПП, нижняя часть которой начинает стягиваться к оси. Ещё через 0,6 мс ставшая шарообразной соединившаяся ПП трансформируется в грибообразную форму. «Шляпка» гриба – это торовидные остатки ПП, а «ножка» – часть возбуждаемого осе-

вого гидротока, охваченная пеленой кольцевого вихря у донной пластины реактора. Такие вихревые кольца могут взаимодействовать [9, 10] в жидкости так, что по оси системы значительно увеличивается скорость гидротока, а количество движения в вертикальном направлении сосредоточивается в системе кольцевых вихрей. В результате кавитационная область распространяется на примерно вдвое большую высоту по сравнению с кавитационной областью в разрядной камере № 1 (см. рис. 3,а). Важно, что в случаях резкого распространения кавитационной области вверх по вертикали, зафиксированных на кинограммах, йодометрический метод фиксирует увеличение интенсивности кавитации в 2,5–3 раза.

**Заключение.** Представленные результаты экспериментов взаимодействия осесимметричных параллельных электрических взрывов под водой показали, что боковые взаимодействия их послеразрядных полостей приводят к возбуждению пространственной структуры течения с кольцевым вихреобразованием. Вихревые кольца, возникающие при развитии кавитационной области, в значительной мере определяют её формирование, существенно увеличивают объём. Продольно-осевые размеры кавитационной области увеличиваются практически в 2 раза.

Таким образом, для увеличения эффективности электроразрядной кавитационной обработки малоразмерных объектов в потоке воды следует выбирать параллельные парные разряды и пространство разрядной камеры с поперечными размерами, равными удвоенным расчетным размерам диаметра послеразрядной полости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Малюшевская А.П., Малюшевский П.П., Левда В.И.* Электровзрывная нелинейная, объёмная кавитация в технологических реакторах. Часть I (электроразрядное генерирование газовой фазы-зародышей кавитации) // *Электронная обработка материалов.* 2004. № 1. С. 46–53.
2. *Малюшевская А.П., Малюшевский П.П., Левда В.И.* Электровзрывная нелинейная, объёмная кавитация в технологических реакторах. Часть II (анализ структуры кавитационных областей) // *Электронная обработка материалов.* 2004. № 2. С. 40–46.
3. *Малюшевская А.П., Малюшевский П.П.* Новый способ управления электроразрядной нелинейной, объёмной кавитацией // *Электронная обработка материалов.* 2007. № 1. С. 76–81.
4. *Пономаренко В.Н., Мельникова Л.И., Шамарин Ю.Е.* Влияние геометрии рабочих камер на электрогидравлическую обработку материалов // *Электронная обработка материалов.* 1978. № 3. С. 82–83.
5. *Вовченко А.И., Кучеренко В.В., Шамко В.В.* Особенности пространственно-временной эволюции парогазовых полостей, генерируемых подводным искровым разрядом // *ПМТФ.* 1978. № 6. С. 58–64.
6. *Pritchett J.W.* Explosion product redistribution mechanisms for scaled migrating underwater explosion bubbles. – *Naval Radiological Defence Lab. Rep. №USNRDL-LR-1044.* 1966. P. 841–848.
7. *Шамко В.В., Кучеренко В.В.* Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда / *Препринт №20, ИИПТ НАН Украины.* Николаев, 1991. 51 с.
8. *Малюшевский П.П., Ющишина А.Н., Смалько А.А., Петриченко Л.А., Тихоненко С.М.* Йодометрическое определение электроразрядной объёмной кавитации // *Электронная обработка материалов.* 2002. № 2. С. 76–79.
9. *Малюшевский П.П.* Явление кумуляции при взаимодействии вихревых колец (Часть I. Экспериментальные наблюдения) // *Электронная обработка материалов.* 2005. № 2. С. 37–44.
10. *Малюшевский П.П.* Явление кумуляции при взаимодействии вихревых колец (Часть II. Обсуждение экспериментальных наблюдений) // *Электронная обработка материалов.* 2005. № 3. С. 36–40.

*Поступила 26.10.09*

## Summary

Influence of free, reflecting surfaces on the cavitation zone excited by parallel underwater discharges is described in the article. Interaction of afterdischarge cavitation pocket and streams with different surfaces is shown. The way of efficiency increasing is offered for electrodischarge cavitation treatment of small objects. The change of stream's direction of motion in the cavitation zone, especially in vertical direction, is possible by positional relationship combining of reflecting surfaces in a reactor.