

ЭЛЕКТРОВЗРЫВНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ОБЪЕМНАЯ КАВИТАЦИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ. ЧАСТЬ 2 (АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ КАВИТАЦИОННЫХ ОБЛАСТЕЙ)

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

Явление электроразрядной нелинейной объемной кавитации (ЭРНОК) весьма перспективно для использования в качестве инструмента воздействия на вещество. Сведения о нем эпизодически появляются в печати [1], однако непосредственные измерения параметров такой кавитации пока не были представлены в связи с трудностями фото- и кинорегистрации явления на фоне масштабных электровзрывных возмущений среды.

Основные методические положения. В результате подбора режима электрических взрывов в водных электролитах и геометрии реактора впервые удалось отснять с помощью скоростной кинокамеры "Пуск-16" кинофильмы–регистраграммы послеразрядной кавитации от момента пробоя до ~ 800 – 3000 мс. Каждая кинорегистраграмма покадрово вводилась в компьютер, анимировалась для полного визуального "живого" рассмотрения, а затем кадр за кадром обрабатывалась по специальной компьютерной программе "Image Analyzer Version 1.0" [2] для оценки во времени пространственных характеристик кавитационной структуры.

Исследования полного генезиса электроразрядной кавитации выполнялись с использованием высокоскоростных камер СКС-1М и "Пуск-16" с улучшенной характеристикой "несостояние изображения" (0,04 мм). Основная использованная скорость съемки – 2500 кадров/с. Один из фильмов был отснят на скорости 500 кадров/с. Применялся режим "старт–стоп", то есть возможность остановки и пуска камеры после протяжки заданной длины киноплёнки от 10 до 120 м, причем задание длины производилось нажатием клавиш на блоке управления. Стробоскопическая осветительная система, в которой применялись импульсные лампы ИСШ-400-3, предназначалась для освещения пространства в разрядной камере через прозрачные две стенки и синхронизировалась кадровыми синхроимпульсами. Эти импульсы соответствовали определенному положению граней призмы компенсатора, то есть были привязаны к началу впечатывания очередного кадра, что позволяло для каждого кадра осуществлять импульсную подсветку.

Вообще синхронизация изучаемого явления с момента регистрации – важнейшее условие исследований быстропротекающих процессов. Оно вытекает из двух обстоятельств. Сами процессы (или их фазы) длятся весьма малые промежутки времени, а регистрирующая аппаратура работает, как правило, с предельными скоростями и также функционирует очень малое время. Соответственно, весьма непросто "застигнуть исследуемое явление в нужном месте, в нужное время". Это достигалось применением управляюще–синхронизирующего устройства. Применялись два типа таких устройств: инициирование изучаемого явления и одномоментно регистрирующей камеры или управляемый запуск камеры, при котором необходимую для синхронизации информацию получали от устройства или самого процесса, воспроизводящих исследуемое явление. Конкретизации выбранного для определенных исследований типа устройств проводились при анализе регистраграмм.

Тесно связан с задачей синхронизации вопрос нанесения на кадр метки – "начало отсчета". Эту метку желательно во всех случаях получать от исследуемого явления по основному каналу камеры. Нами использовано либо свечение самого канала электрического разряда (КЭР), либо передача в кадр по световоду свечения из коммутатора разрядного контура.

Наконец, был найден и в некоторых случаях применен метод контрастирования кавитационной области незначительным понижением начального внешнего давления (от нормального до ~ 0,09 МПа) и установлением определенного угла направления подсветки к оси съемки.

Процесс возбуждения электроразрядной кавитации значительно усиливается в таких режимах электрических разрядов, когда предпробойные явления используются как источники газовых

микробузырьков–зародышей кавитации.

В разрядной камере прямоугольной формы производилась киносъемка полного послеразрядного генезиса всех физических явлений. Внутреннее ее пространство имело размеры $0,1 \times 0,08 \text{ м}^2$, высоту – 0,1 м. Глубина раствора в реакторе была 0,09 м, то есть образовывалась свободная поверхность. Продольная ось электродной системы со стержневыми противостоящими электродами находилась под свободной поверхностью на расстоянии 0,035 м и делила реакционный объем на два полупространства – верхнее и нижнее. При этом введенная в КЭР энергия была экспериментально установлена 7,2 Дж ($U_0 = 10 \text{ кВ}$; $C = 0,15 \text{ мкФ}$). При большей энергии из-за малого объема жидкости сразу же после активной стадии разряда сильные гидродинамические возмущения приводили к полной светонепроницаемости жидкости в камере, и соответственно рассматривать и изучать детали кавитационных процессов на послеразрядной стадии оказалось невозможным.

Результаты экспериментальных исследований. Одна из особенностей подводного электрического взрыва (ПЭВ) заключается в образовании и пульсации подводного пузыря, активно развивающегося в послеразрядной стадии и, конечно, оказывающего влияние на генезис электроразрядной нелинейной объемной кавитации [3]. Подводный пузырь сам является источником волн давления и разряджения. При первом же движении стенок послеразрядной полости (ПП), направленной к центру разрядного промежутка при ее захлопывании (коллапсе), в окружающей жидкости создается поле пониженного давления. В нем и начинает резко усиливаться ЭРНОК, несколько раньше вызванная первичной ударной волной при отражениях от границ жидкости в разрядной камере. При определенных условиях и режимах ПЭВ она может существовать вместе с ПП, перестраиваясь при ее пульсациях.

Нами были отсняты несколько фильмов таким образом, что в информативную часть их попали все стадии ПЭВ: от нулевой предпробойной стадии до дальней послеразрядной. К тому моменту на границе раздела вода–воздух уже хорошо видны даже поверхностные волны из-за вертикального смещения свободной поверхности при падении на нее ударного фронта, а границы ПП постепенно исчезают в поле кадра вместе со всплесковыми волнами на поверхности.

Для подробных съемок были выбраны разряды в рабочих средах, близких к реальным по электропроводности технологических растворов: 6,9; 12,0 Ом·м при нормальных условиях и в магнитных полях. Главным критерием для отбора служил объем газовыделения в предпробойной стадии по результатам исследований, изложенных в первой части статьи.

На всем протяжении киносъемок процесса (до ~ 3 с по текущему времени) подсветка обеспечивала получение четких и контрастных кадров, фиксировавших сотни и тысячи моментов возникновения и генезиса ЭРНОК во всем объеме разрядной камеры.

Следует отметить, что так как все фильмы о послеразрядной кавитации, включающие от ~ 1000 до 2000 кадров, поместить в статью невозможно, как и даже один из них, показаны только их характерные фрагменты (по каждому из вышеназванных диапазонов удельного сопротивления) в чисто иллюстративных целях. Однако нижеприведенные описания кавитации по каждому фильму выполнены при покадровом визуальном (с увеличением) просмотре ленты фильма и, естественно, полностью соответствуют действительности.

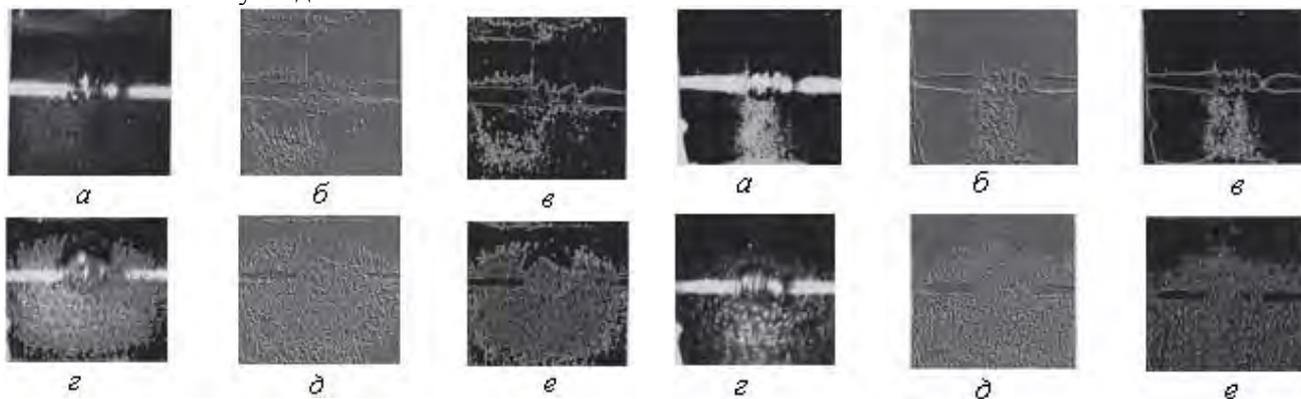


Рис. 1. Кадры ЭРНОК в воде с $\rho = 12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в магнитном поле: верхний ряд – к моменту времени 5 мс; нижний ряд – к моменту времени 10 мс (пояснения в тексте)

Рис. 2. Кадры ЭРНОК в воде с $\rho = 12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ вне магнитного поля: верхний ряд – к моменту времени 5 мс; нижний ряд – к моменту времени 10 мс (пояснения в тексте)

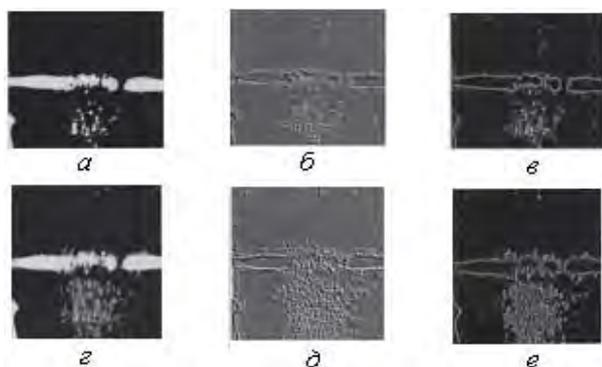


Рис. 3. Кадры ЭРНОК в воде с $\rho = 6,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в магнитном поле: верхний ряд – к моменту времени 5 мс; нижний ряд – к моменту времени 10 мс (пояснения в тексте)

На рис. 1 (далее – на рис. 2 и 3) в качестве примера приведены кондиционированные негативы фото кадра (в разные моменты времени по верхнему и нижнему ряду) с изображением кавитационной области (а, з), который подвергался программной компьютерной фильтрации для более полного и четкого выявления структуры: фильтры "Рельеф поверхности" (б, д), фильтры "Лапласа" (в, е). Анализ выполнялся по компьютерной программе "Image Analyzer Version 1.0". Результаты полного анализа приведены в таблице, в которую помещены главные характеристики области кавитации. Таким образом, обработан каждый кадр фильма генезиса ЭРНОК, что позволило установить кинетику развития области кавитации. Это дополнило "ручной" анализ событий в кавитационной области новой важнейшей информацией. Полностью весь процесс, как результат "ручного" анализа, описан ниже.

Данные таблицы являются результатом статистической обработки полученных в процессе измерения характеристик объектов. Это позволило определить средние значения пространственных характеристик структуры области кавитации. Программа настраивалась так, чтобы не анализировать кавитационные пузырьки (КП), размеры которых были больше 0,5 мм (считаем их чисто газовыми) и меньше 1 мкм (считаем их только зародышами кавитации). Глубина просмотра при анализе равнялась 40 мм, то есть примерно 0,5 всего объема.

Главные характеристики кавитационной области на 24 мс в среде с $\rho = 12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в магнитном поле

Яркость	Количество	Содержание, %	Размер, мкм	Расстояние, мкм
0	фон	67,765	–	–
16	30	0,005	< 1,0	530
32	380	0,075	9,4	340
48	230	0,052	11,1	390
64	90	0,39	39,7	480
80	150	0,067	37,4	550
96	590	0,173	20,8	530
112	470	0,216	41,3	420
128	740	0,553	62,8	440
144	780	0,812	74,6	490
160	650	1,405	134,3	330
176	1150	8,932	355,1	470
192	1180	16,979	412,6	550
208	620	2,528	220,6	490
224	180	0,257	99,2	420

Визуальные наблюдения ЭРНОК в среде с $\rho = 12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в магнитном поле

В этом диапазоне изменения удельного сопротивления рабочей среды в разрядной камере необходимо было выполнить целевые наблюдения послеразрядных процессов, поскольку это единственный диапазон, в котором объем газовой выделения в разрядном промежутке в предпробойной стадии не только не уменьшается в магнитном поле, но даже увеличивается (см. первую часть статьи). Поэтому съемки послеразрядных процессов выполнялись с частотой 2500 кадров/с, и описание наблюдаемых явлений также выполнено покрупно и подробно.

Процесс развития ЭРНОК начинается при отражении первичной ударной волны от свободной поверхности, и основные стадии развития ПП происходят на фоне бурного генезиса ЭРНОК, имеющей свои фазы развития.

После "нулевого" кадра (вспышка и засветка) уже на первом кадре видна движущаяся (расширяющаяся) послеразрядная полость. Ко времени 1,2 мс ПП как бы останавливается, а затем начинает движение на захлопывание. Практически именно в этот момент сразу во всем объеме возникает кавитационная область, четко просматриваемая с 1,5 мс как результат снижения давления в окружающей жидкости. Кавитационные пузырьки в ней – растущие, пульсирующие, захлопывающиеся и

вновь возникающие.

Ниже горизонтальной оси электродной системы (так называемое “нижнее полупространство”) кавитационных пузырьков значительно больше, и максимальный радиус их достигает $\sim 0,5$ мм, но количество их сравнительно мало – в кавитирующем объеме значительно больше КП меньших размеров.

Движение к захлопыванию ПП несимметричное. Нижняя часть ПП движется к центру быстрее верхней и, более того, в целом ПП захлопываясь, как бы смещается единым целым в сторону свободной поверхности. Соответственно, в нижнем полупространстве разрядной камеры в это короткое время растягивающие напряжения больше, чем в верхней, а значит, лучше условия для возникновения разрывов жидкости.

В той части разрядной камеры, которая расположена выше оси электродной системы (так называемое “верхнее полупространство”), КП возникают в меньшем количестве и достигают меньших максимальных размеров ($R_{\max} \approx 0,25$ мм). В этом полупространстве так же наблюдаются все стадии жизни КП: растущие, пульсирующие, захлопывающиеся и вновь возникающие.

Таким образом, несимметричная по плотности КП кавитационная область, сравнимая по размерам с размерами разрядной камеры, относительно длительное время существует и живет по своим законам в поле переменных по величине растягивающих напряжений в жидкости, создаваемых изначально отраженными от свободной поверхности и дна ударными волнами, а в дальнейшем активно подпитываемых схлопывающейся ПП. Свободная поверхность воды в разрядной камере пока остается спокойной, невозмущенной, горизонтальной. Однако ее уровень заметно приподнимается на ~ 4 мм, что позволяет определить общий объем пузырьков, вычтя объем ПП, равный в этот момент примерно $3,59 \text{ см}^3$ из общей прибавки объема, что составляет объем газовой фазы около 31 см^3 . Это, в свою очередь, позволяет ориентировочно вычислить суммарное количество пузырьков и в соответствии с [4] получить усредненную величину $5,45 \cdot 10^6$. При этом кавитационная область является средоточием множества кавитационных процессов (которые мы опишем ниже) и непрерывно изменяется во времени.

Необходимо отметить интересное явление. Как только появляются КП \sim к 1,5 мс, вокруг ПП возникает присоединенный слой – тонкая оболочка воды без КП (это как бы зона сжатия или повышенного давления) и ПП быстро (примерно к 2,2 мс) приобретает яйцеобразную форму с острым концом, ориентированным к свободной поверхности. Толщина этого слоя – оболочки воды для момента времени 1,5 мс составляет от 2 до 3 мм. По мере развития яйцевидности нижний (тупой) участок его утончается до 1 мм, а верхний (острый) – увеличивается до ~ 5 мм к 2,8 мс и даже ~ 15 мм к 4,4 мс. Однако к названному моменту к ПП возвращается сферичность.

Выход волны сжатия на свободную поверхность наблюдается в виде просветленной полоски, пульсирующей по длине. Вслед за этим происходит рост купола. По мере этого его стенки становятся круче. Существенное влияние на характер движения и форму купола оказывает ПП. В какой-то момент к вершине купола от верхнего острого конца бескавитационной области начинает прорастать воронковидное образование (бескавитационное и поэтому хорошо просматриваемое к 5 мс).

На этом заканчивается первая фаза генерирования ЭРНОК в послеразрядной стадии.

Понятно, что деление на фазы совершенно условный прием, имеющий только некоторое значение для систематизации событий в кавитационной области. Истинный же генезис ЭРНОК в послеразрядной стадии непрерывен.

Купол на свободной поверхности продолжает расти, а кавитационная область начинает уменьшаться в размерах, просветляясь в самых дальних от центра ПП частях, сфероидизируясь и принимая каплеобразную форму. В ней появляется структурированность в виде чередующихся слоев с большей и меньшей плотностью пузырьков, имеющая, тем не менее, сферическую симметрию с центром в ПП (от 5,6 до 6,4 мс). Очевидно, что слои появляются в результате взаимодействия волн разряджения-сжатия локально на границе раздела жидкость – ПП, аналогично взаимодействию первичной ударной волны со свободной поверхностью воды в разрядной камере [5], порождающей волну кавитации (кадр “нулевой”) путем создания нескольких слоев с растягивающими напряжениями. Фактически при наличии двух граничных поверхностей происходит многократное отражение волн. В результате количество волновых возмущений, распространяющихся от границ, возрастает в геометрической прогрессии.

На свободной поверхности, как продолжение воронковидного образования, образуется кольцевой всплеск воды (от 6,8 до 7,2 мс) и возникает воронка, от поверхности острой оконечностью направленная к ПП. Она быстро прорастает в глубину и замыкается на ПП, соединяя ее на короткое время с атмосферой. При этом в верхнем полупространстве разрядной камеры резко уменьшается

количество КП (от 7,6 до 8,0 мс). В верхней части ПП образуется кольцевой вихрь – следствие движения высокоскоростной струи, направленной в ПП. За счет захваченного воздуха свободная поверхность приподнимается на 4 – 5 мм.

На свободной поверхности возникают и развиваются поверхностные (гравитационные) волны. На левой периферии послеразрядной полости в верхнем полупространстве появляются пузырьковые структуры (от 12,4 до 12,8 мс), которые разрастаются и захватывают также правую периферию (от 13,6 до 14,0 мс). Свободная поверхность практически не просматривается, превращаясь в пелену брызг (от 14,8 до 15,2 мс).

Затем на поверхности, которая вновь начинает просматриваться с ~ 16 мс, возникает провал на месте купола, а у левой и правой границ (стенки) разрядной камеры происходит высокий всплеск жидкости (от 16,4 до 20,0 мс). Послеразрядная полость быстро заполняется водой и начинает терять свою симметричную форму (от 19,2 до 20,0 мс).

На этом завершается вторая фаза генерации ЭРНОК послеразрядной полостью.

Далее газовая часть ПП как бы всплывает, и ее макроструктуру продолжают искажать хаотические вихревые движения (кадры 51–55 или от 20,4 до 22,0 мс), а та часть, где находилась нижняя полусфера ПП, замещается водой с мельчайшими КП. Свободная поверхность сильно искажается беспорядочными волнами. Сталкивающиеся потоки жидкости вместе с захваченным с поверхности и диспергированным воздухом заполняют всю область ПП вместе с пространством, где находилась воронка (от 22,4 до 26,8 мс), располагаются преимущественно в верхнем полупространстве и как бы создают новую кавитационную область.

В то же время в нижнем полупространстве ранее возникшая кавитационная область продолжает сокращаться. Одновременно сюда прорывается значительная часть захваченного с поверхности воздуха, который заполняет более половины пульсирующих КП. Размеры кавитационных пузырьков здесь возрастают, они коагулируют в ячеистые структуры и последовательными волнами через область, где ранее находилась ПП, выбрасываются к свободной поверхности, хорошо визуализируясь (от 26,8 до 46 мс) и способствуя хаотическому волнообразованию на ней, а также создавая новую пелену брызг. Общее количество визуализированных газовых пузырьков пропорционально развитости ЭРНОК. Следует отметить, что слоистая структура кавитационной области в нижнем полупространстве сохраняется на всем протяжении этих процессов. Последний слой этой области выбрасывается в новую область кавитации на месте ПП к 45,2 мс.

Экспериментально обнаруженный факт пропорциональности объема газовых пузырьков, визуализировавшихся в рассматриваемой фазе генерации кавитации, объему ЭРНОК в целом использован нами для экспресс-анализа общей интенсивности кавитации при исследовании влияния изменения геометрии электроразрядных камер, режимов разрядов и сравнения данных иодометрии.

Начиная ориентировочно с 50-й миллисекунды в нижнем полупространстве несколько ниже кавитационной области на месте ПП начинают образовываться слои очередной (3-й) кавитационной области. Это происходит в результате взаимодействия остаточных волн сжатия-растяжения (после многократного отражения) с границей кавитационной области на месте ПП. Вместе они устремляются вниз ко дну ЭР камеры так активно и интенсивно, что верхнее полупространство практически освобождается от кавитации к 83,2 мс. В конечном итоге и эта кавитационная область как бы через устойчивую кавитационную область на месте ПП выбрасывается к свободной поверхности (от 83,6 до 100 мс), предварительно остановившись у дна ЭР камеры.

На свободной поверхности все это время происходят хаотическое волнообразование, всплескивание и брызгообразование.

У дна ЭР камеры 3-я кавитационная область некоторое время пульсирует и в ней происходят чередующиеся вихреобразования (кадры 252 – 300), она то отрывается от дна камеры, то вновь опускается на него и приостанавливается. Объем этой “объединенной” кавитационной области занимает ~20% от нижнего полупространства и связан некими косяками с верхним полупространством. В свою очередь в этой области то возникают, то исчезают четко различимые радиальные, слоистые структуры, сменяющиеся, наконец, аксиальными (к 136 мс). Ориентировочно к 148 мс она начинает расширяться и несколько просветляться, обретая сферическую структурированность (168 мс).

В верхнем полупространстве обозначается новая (4-я) область кавитации (180 мс).

Затем начинается отрыв 3-й кавитационной области от дна ЭР камеры (194 мс). При этом она становится полностью сферической; ниже ее справа вновь развивается слоистая кавитация (во временном интервале от 200 до 214 мс) и почти симметрично кавитация в верхнем полупространстве от свободной поверхности к оси электродной системы.

Теперь эта кавитационная область в нижнем полупространстве уже занимает около 35% объ-

ема и вновь обретает в придонной части радиальную слоистость. Однако ее плотность приблизительно в два раза меньше. Она опускается полностью в нижнее полупространство так, что взаимодействует с дном разрядной камеры и растекается по дну, занимая уже 50% объема нижнего полупространства (~220 мс), пульсирует, что заметно по периодическому изменению ее плотности.

В верхнем полупространстве кавитационная область принимает практически прямоугольную форму, простирается от оси электродной системы до свободной поверхности, волнение которой заметно уменьшилось. Такое состояние кавитационной области сохраняется довольно долго (от 220 до 260 мс), то усиливаясь, то ослабляясь. Причем на всем протяжении существования 3-й кавитационной области в ее верхней части в качестве своеобразного задающего генератора кавитации существует вихреподобная структура, образовавшаяся на месте ПП и опустившаяся глубоко в нижнее полупространство, сохраняя свой линейный размер-диаметр, приблизительно равный диаметру ПП в момент прорыва в нее водовоздушного потока от свободной поверхности. Именно она возвращает слоистость кавитации 3-й кавитационной области после ее исчезновения на короткое время (описано выше). Пузырьковые структуры на всем протяжении “жизни” этой кавитационной области весьма изменчивы и подвижны внутри нее.

В конце концов, в верхнем полупространстве кавитация исчезает (~ 276 мс), а вихреподобная структура вплотную приближается (возвращается) к разрядному промежутку. Воздухонаполненные пузырьковые ее структуры распространяются примерно на 75% объема нижнего полупространства.

Приблизительно с 320 мс заметен отрыв кавитационной области от дна разрядной камеры, а слоистость, теперь уже концентричная с вихреподобной структурой, сохраняется. Вихреподобная же структура подходит вплотную к границе нижнего и верхнего полупространств, пока явно не переходит в последнее. Плотность кавитационных пузырьков продолжает уменьшаться, хотя общий объем области кавитации (в границах области) еще значительный, не менее 60% нижнего полупространства к 344 мс.

Приблизительно на 350 мс головная часть вихреподобной структуры преодолевает границу полупространств и проникает в верхнее полупространство. На свободной поверхности вновь возникают гравитационные волны, а по оси кольцевого вихря возникает новый купол. Сам кольцевой вихрь на некоторое время задерживается (приостанавливается) на месте ПП с центром в разрядном промежутке. В верхнем полупространстве появляются несколько разрозненных КП. Нижнее полупространство продолжает кавитировать, а от 370 мс происходит заметная подвижка кольцевого вихря вверх. В приповерхностных слоях верхнего полупространства вновь образуются КП.

К 400 мс (это 1000-й кадр) вихреподобная структура полностью переходит в верхнее полупространство, хотя активные кавитационные проявления остаются и в нижнем полупространстве. Над кольцевым вихрем продолжает расти купол.

Приблизительно на 412 мс кольцевой вихрь поднимается под самую свободную поверхность и вовлекает в вихревое движение приповерхностные слои воды, а под ними возникают, исчезают и вновь возникают (чтобы потом исчезнуть) незначительные области кавитации. В вихреподобной структуре начинается и разрастается процесс укрупнения КП, при этом ближайšie к свободной поверхности схлопываются, вытягиваясь по направлению к ней и выбрасывая мельчайшие струйки жидкости (кадр 1080 – 1085 или от 432 до 434 мс). На 440 мс становится заметным формирование новой вихреподобной структуры, наполненной КП на оси разрядного промежутка, четко обозначившейся к 442 мс и чуть (на 10 мм) сдвинутой вправо (от наблюдателя) так, чтобы расположиться на одной оси с кавитационной областью в нижнем полупространстве.

Верхний кольцевой вихрь на 446 мс прорывает купол. Кавитационные процессы в верхнем полупространстве гаснут, однако новый кольцевой вихрь устремляется на ее место к поверхности, а на оси электродной системы в том же месте формируется следующая “новая”, хорошо заметная на 1133 кадре. Группы КП из хорошо сформировавшейся кавитационной области верхнего полупространства (занимает к 453 мс 30% объема) также устремляются к поверхности. Купол на свободной поверхности продолжает бурлить. Объемы кавитационных областей в верхнем и нижнем полупространстве выравниваются (480 мс), однако концентрация КП в целом заметно уменьшается. Верхняя и нижняя области кавитации соединяются.

По какой-то до конца не выясненной причине, пульсируя, все КП окончательно захлопываются в вершине купола, перемещаясь туда из всей объединенной кавитационной области, участвуя (теперь ясно) в общем циклоническом движении, что не исключает развитие и исчезновение местных вихрей (540 мс). При этом на поверхности купола возникают буруны (496 мс или кадры 1240 – 1250). В конечном итоге вся общая кавитационная область уходит от дна разрядной камеры, постепенно перемещаясь к свободной поверхности. Отметим еще постоянную пульсацию ее, как целого, что хо-

рошо заметно то по открывающимся (кадр 1230 – 1235), то скрывающимся (кадр 1274 – 1275) за облаком мельчайших КП электродной системы.

Постепенно к 512 мс становится заметным, что уже большая часть кавитационной области располагается в верхнем полупространстве. Купол начинает разваливаться из-за обилия пульсирующих и схлопывающихся КП, а затем, высвободив очередную порцию энергии КП и уменьшившись, вновь приобретает некую целостность (монолитность).

Наконец интенсивность кавитации в общей кавитационной области сильно уменьшается, и она практически вся сосредотачивается в верхнем полупространстве (580 мс). Однако с 584 мс возобновляется кавитационная активность в нижнем полупространстве (около 10%) и одновременно в верхнем (около 80%).

Все же купол заметно опадает (614 мс), хотя кольцевой вихрь долго и хорошо виден непосредственно над осью электродной системы в зоне разрядного промежутка. Этот кольцевой вихрь очень динамичен и устойчив. Но все же, в конце концов, и он исчезает, на свободной поверхности вместо купола перекатываются несколько волн, а под свободной поверхностью только несколько разрозненных малых вихрей напоминают о недавнем существовании вихреподобной кавитационной структуры и бушевавшей общей нелинейной объемной кавитации в разрядной камере.

Свободная поверхность, наконец, выравнивается примерно к 750 мс.

Цикл возбуждения, генезиса и прекращения электроразрядной объемной нелинейной кавитации завершен.

Подобный же генезис ЭРНОК, возбуждаемой в реакторах с $\rho = 12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в отсутствие магнитного поля и при $\rho = 6,9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в магнитном поле, представлен на рисунках 2 и 3, но с объемом области кавитации, соответствующей количеству газовыделения в предпробойной стадии.

Таким образом:

- впервые визуализирован полный цикл возникновения, развития и затухания электроразрядной нелинейной объемной кавитации в послеразрядной стадии подводного ЭВ;
- зарождение кавитации начинается еще в предпробойной стадии подводного электрического разряда;
- развитая, интенсивная ЭРНОК в послеразрядной стадии ЭВ характерна для режимов разрядов, которые в предпробойном периоде отличаются значительным выделением газовой фазы; это условие обязательное, но недостаточное, и должно быть дополнено также обязательным пробоем разрядного промежутка;
- генезис послеразрядной ЭРНОК простирается в далекую послеразрядную стадию так, что она заметна даже во временном интервале от 0,2 до 0,5 с, следовательно, с целью создания условий коллапса КП под действием импульса давления первичной ударной волны, следующего за предшествующим разрядом, частота посылок импульсов должна выбираться от 2 до 5 Гц;
- некоторые важные параметры ЭРНОК удалось измерить при анализе кинограмм с помощью специальной компьютерной программы "Image Analyzer Version 1.0";
- наличие свободной поверхности жидкости в разрядной камере – обязательное условие генерирования полноценной ЭРНОК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юцишина А.Н., Малюшевский П.П., Смалько А.А. и др. Йодомеритрическое определение электроразрядной объемной кавитации // Электронная обработка материалов. 2002. № 2. С. 76 – 79.
2. Стась О.М., Гаврилюк В.П. Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі // Металознавство і обробка металів. 2000. № 1–2. С. 48 – 52.
3. Литвиненко В.П., Шамко В.В., Деревянко Ю.И. Влияние жесткой оболочки на динамику парогазовой полости // Основные проблемы разрядно-импульсной технологии. Киев, 1980. С. 50–61.
4. Розенберг Л.Д. Мощные ультразвуковые поля. М., 1968.
5. Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. М., 1963.

Поступила 07.07.03

Summary

The experimental outcomes of the visualized electrodigit non-linear, volumetric cavitation (EDNVC) in aqueous solutions are submitted, depending on nature of outgassing in discharge gaps before a breakdown. The analysis of parameters EDNVC was conducted using a special computer program "Image Analyzer Version 1.0". The main peculiarities of the phenomenon are discussed.