

А.П. Малюшевская, П.П. Малюшевский

### НОВЫЙ СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ, ОБЪЕМНОЙ КАВИТАЦИЕЙ

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

Ранее нами была описана электроразрядная нелинейная, объемная кавитация [1, 2], сильно зависящая (при идентичных параметрах разрядного контура) от геометрии разрядного объема, взаиморасположения днища, стенок разрядного реактора и свободной поверхности жидкости в нем; жесткости конструкции реактора, величины внешнего статического давления в его жидкости. Кавитация в таких электроразрядных реакторах возбуждается при отражении первичных волн давления (подводный электрический разряд – по существу электрический взрыв) от свободной поверхности жидкости в реакторе и его стенок, ограничивающих жидкость со всех сторон. Как правило, условный радиус подобных реакторов составляют 2–3 радиуса послеразрядной полости разрядов с технологическими параметрами.

Конечно, электроразрядная кавитация используется в основном для обработки малоразмерных объектов, и, на первый взгляд, малые размеры электроразрядного реактора не играют решающей роли. Но это так только при порционной или непрерывной обработке малых объемов материалов. Когда же необходимо обрабатывать значительные объемы материалов в больших количествах воды (рабочей жидкости), то все ограничивающие разрядную зону отражающие поверхности приходится располагать на значительных расстояниях (5–10 и больше радиусов послеразрядной полости). Их эффективность становится ничтожной.

Следовательно, необходимо и актуально искать пути обеспечения возможности возбуждения эффективной электроразрядной кавитации в больших открытых объемах рабочей жидкости, например в технологических ваннах конвейерных установок для обработки волокнистых материалов и т.п.

Один из самых доступных путей достижения такой цели – использование сходящихся волн давления, генерируемых в области подводного электроразряда [3, 4].

Простая схема взаимодействия подводных волн давления представлена на рис. 1.

После достижения сходящимися волнами давления положения, обозначенного цифрой 3, за точками пересечения фронтов возникают условия, благоприятные для возбуждения кавитации. Они появляются вследствие того, что при электровзрыве за волной давления (сжатия) непременно следуют волны разрежения (растяжения), которые и вызывают разрывы сплошности жидкости. Эти области кавитации существуют короткое время, но роль их велика – они активируют околоразрядное пространство, оставляя в нем множество зародышей кавитации.

Тем временем, как известно [5, 6], канал разряда превращается в послеразрядную парогазовую полость, которая растет, расширяется и при уменьшении в ней давления до величины внешнего давления начинает захлопываться (коллапсировать). Естественно, при движении стенок этой полости вовнутрь в среде возникают растягивающие напряжения, благоприятные для кавитации.

На рис. 2 представлена тенеграмма процесса взаимодействия трех волн давления-разряднения. Хорошо видны темные области кавитации за точками пересечения фронтов. По мере угасания кавитации эти области просветляются, поскольку основная масса кавитационных пузырьков в поле давления коллапсирует, оставляя мельчайшие зародыши кавитации. Именно на этих зародышах кавитации при захлопывании послеразрядной полости должны возникать кавитационные разрывы сплошности жидкости.

Ранее мы наблюдали [5] подобное явление в несколько иной ситуации. Оно возникало при взаимодействии сходящихся плоских ударных волн на сравнительно большом расстоянии от места возбуждения электрического взрыва.

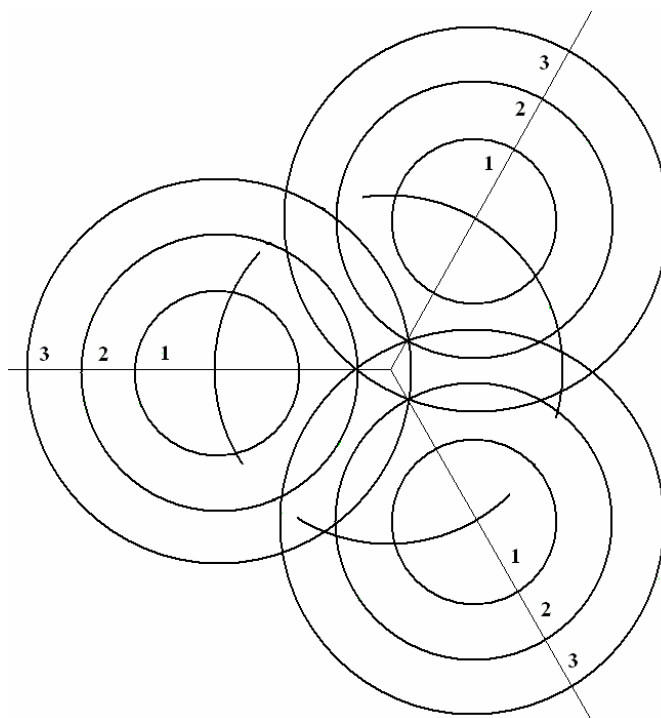


Рис. 1. Схема взаимодействия в 3-ударной конфигурации («тришоки») сходящихся электроразрядных ударных волн. 1, 2 и 3 – положение ударных волн в различные моменты времени

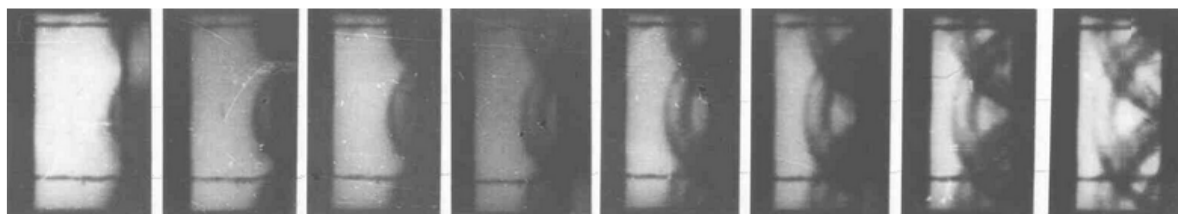


Рис. 2. Тенеграмма процесса взаимодействия трех волн давления-разряджения

На рис. 3 приведена кинограмма процесса возбуждения мощной кавитации в реакторе большого объема как результат взаимодействия двух плоских ударных волн, полученных с помощью плазменных ускорителей в воде (торцы ускорителей видны внизу кадра в каждом углу). Здесь основной особенностью экспериментов являлась возможность управляемого получения сходящихся ударных волн в строго заданной области разрядной камеры, куда они направлялись из двух ускорителей при энергии в импульсе на каждом ускорителе 6–12 кДж. Такой прием позволял получать относительно равномерную кавитационную область вдали от границ с твердой поверхностью и в относительной изоляции от послеразрядных парогазовых полостей (без прямого примыкания), что дало возможность изучать электроразрядную кавитацию в чистом виде.

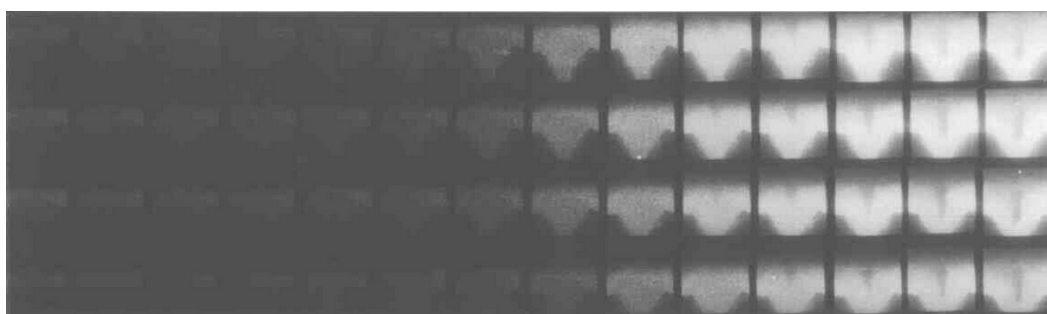


Рис. 3. Кинограмма процесса возбуждения мощной кавитации в реакторе большого объема

Примерно через 55 мкс после подачи синхронных токовых импульсов на плазменные ускорители в толще жидкости (область с центром, расположенным примерно в точке пересечения осей ускорителей) возникает локальная кавитационная область (см. рис. 3) и быстро, менее чем за 10 мкс, принимает клиновидную форму с характерными размерами: шириной основания 4–6 см, длиной 4–6 см и изменяющейся высотой 6–1 см. Эта первичная, стабильная кавитационная область в виде туманообразного облака с большой плотностью (до  $5 \cdot 10^6$  1/см<sup>3</sup>) очень мелких ( $r \leq 3$  мкм) кавитационных пузырьков возбуждается сходящимися ударными волнами (генерируемыми плазменными ускорителями), за фронтом которых следуют волны разрежения.

Детальное рассмотрение локальной кавитационной области позволило установить, что она совершает быстрое перемещение в пространстве с изменением его направления перемещения. Скорость перемещения головной части этой первичной кавитационной области составляет от 0,5 до 1,5 км/с, а продолжительность таких пульсаций после возникновения туманообразной структуры – 150–200 мкс. Эти характеристики заметно зависят от величины угла схождения ударных волн, а также от пульсаций послеразрядных парогазовых полостей и соответственно от волн сжатия в плазменных ускорителях.

На всем протяжении времени этих пульсаций первичной кавитационной области в подповерхностном пространстве возникает и сравнительно плавно утолщается кавитационный слой, возбужденный отраженными в противофазе от поверхности первичными ударными волнами плазменных ускорителей. Начиная с 12 кадра (около 50 мкс после возникновения локальной, клинообразной кавитационной области) становится заметной кавитация и в нижней части разрядной камеры, но пульсирующая синхронно пульсациям первичной кавитационной области.

Через 220–250 мкс и в рассматриваемую область возвращается отраженная от свободной поверхности ударная волна в виде волны разрежения, и за следующие 50–70 мкс объемная кавитация охватывает всю регистрируемую толщу жидкости (см. рис. 3), а затем весь объем разрядной камеры. При этом размер кавитационных пузырьков значительно увеличивается (до 0,1–1,0 мм) по сравнению с размерами кавитационных пузырьков в локальной кавитационной области.

Как видим, сходящиеся плоские ударные волны являются эффективным средством возбуждения кавитации в разрядной камере. Но экономичность этого способа нельзя назвать высокой – слишком дорогостояща система подводных плазменных ускорителей и высоки дополнительные энергозатраты. Очевидна целесообразность отыскания других вариантов управления подводными электрическими разрядами с обеспечением максимальной кавитации в свободном объеме при каждом разрядном импульсе. Конечно, следует сохранить и использовать феноменальные возможности подводных сходящихся-расходящихся волн давления как генераторов кавитационных процессов.

#### **Экспериментальные исследования**

Нами выполнены исследования процессов генерирования кавитационной области в свободном объеме жидкости при взаимодействии двух послеразрядных полостей. Последние, исходя из принятой гипотезы, создавались параллельно осуществляемыми разрядами. Были выбраны следующие параметры разрядных контуров: рабочее напряжение  $U_0 = 25$  кВ, электрическая емкость  $C = 1$  мкФ, длина разрядного промежутка  $l_p = 10$  мм, разрядный промежуток предварительно замыкался медной проволочкой диаметром  $d = 5$  мкм, расстояние между электродами  $A = 100$  мм.

Электроды ( $d_e = 3$  мм) изготавливались из титановой проволоки и, помимо основного назначения, выполняли роль индикатора возникновения пониженного давления (появления растягивающих напряжений в воде), отклоняясь в сторону области такого давления.

Для оценки влияния на кавитационную область изменения рабочего напряжения его уменьшали в 1,4 раза, то есть до  $U_1 = 17,8$  кВ (при постоянной величине энергии в импульсе).

Все стадии генезиса параллельных электрических разрядов в воде регистрировались высокоскоростной фотоустановкой ВФУ-1 в режиме «лупа времени». Все представленные здесь фоторегистрограммы имеют интервал времени между кадрами  $t_i = 1,28$  мс.

На рис. 4 приведены фоторегистрограммы зарождения и развития кавитационной области в воде, порожденной двумя взаимодействующими параллельными разрядами. Рис. 4,а соответствует разрядам, произведенным строго синхронно ( $\Delta t = 0$ ), рис. 4,б – разрядам, начало одного из которых задержано на очень короткий промежуток времени ( $\Delta t = 2$  мкс).

На первой фоторегистрограмме (см. рис. 4,а) показано, что обе послеразрядные полости развиваются симметрично и в стадии активного роста мало влияют друг на друга. Их формы не меняются, остаются правильными, поле давлений в пространстве между электродами остается симметричным (электроды остаются параллельными) вплоть до достижения парогазовыми полостями макси-

мальных своих размеров (кадры 1–7). Но как только начинается схлопывание (коллапс) послеразрядных полостей, в воде между параллельными электродами возникает зона пониженного давления, электроды отклоняются к центру межэлектродного пространства (кадр 8), и фактически строго между электродами возникает и развивается кавитационная область (кадры 8–14). Индекс кавитации в ней весьма велик ( $K \approx 0,7$ ).

На второй фоторегистрограмме (см. рис. 4,б) показано, что даже небольшая несинхронность параллельных разрядов вызывает очевидную несимметричность развития кавитационной области, хотя ее объем, а также индекс кавитации мало изменяются. Электроды как индикаторы понижения давления четко фиксируют (кадры 8–11) наличие зоны пониженного давления в пространстве между ними. Однако зона пониженного давления существует заметно меньшее время (3,84 мс против 8,96 мс при строгой синхронности).

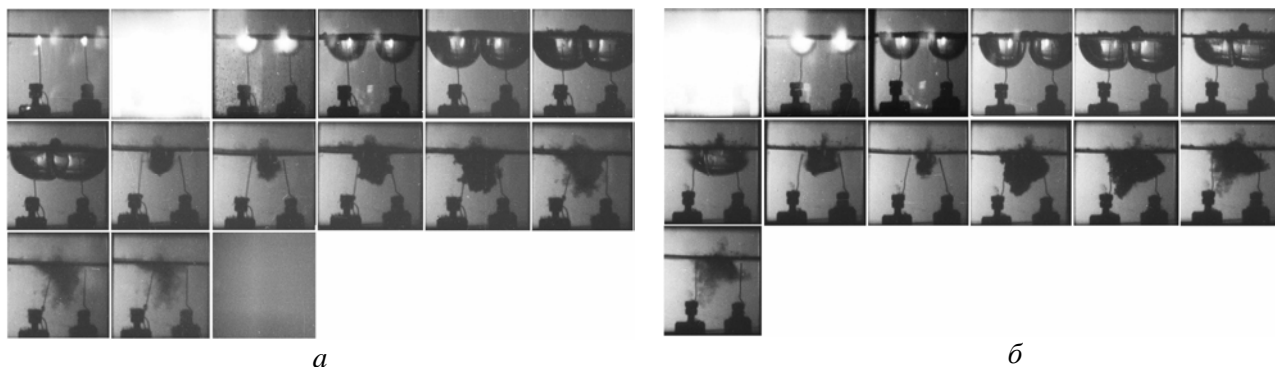


Рис. 4. Зарождение и развитие кавитационной области между тонкими стержневыми электродами при параллельных электрических разрядах: а – строго синхронных ( $\Delta t = 0$ ); б – с небольшой задержкой начала одного из разрядов ( $\Delta t = 2$  мкс)

На рис. 5 приведены фоторегистрограммы зарождения и развития кавитационной области в воде, порожденной двумя взаимодействующими параллельными разрядами при существенно измененных условиях. Рис. 5,а соответствует разрядам, начало одного из которых задержано на значительный промежуток времени ( $\Delta t = 8$  мкс), рис. 5,б – разрядам с  $U_1 = 17,8$  кВ, произведенным строго синхронно ( $\Delta t = 0$ ).

При значительной несинхронности начальных стадий разряда (см. рис. 5,а) резкое различие в размерах послеразрядных полостей (кадры 1–7) приводит к несимметричному захлопыванию их, малому понижению давления в пространстве между электродами и соответственно к несимметричной по форме кавитационной области (кадры 8–14) со значительно меньшей плотностью кавитационных пузырьков ( $K \approx 0,2$ ), к тому же быстро распадающейся (кадры 11–14).

При понижении рабочего напряжения до  $U_1 = 17,8$  кВ даже при строгой синхронности воспроизводства разрядов (кадры 1–10) уменьшается величина растягивающих напряжений в пространстве между электродами, уменьшаются объем кавитационной области и интенсивность кавитации (индекс кавитации  $K \approx 0,4$ ).

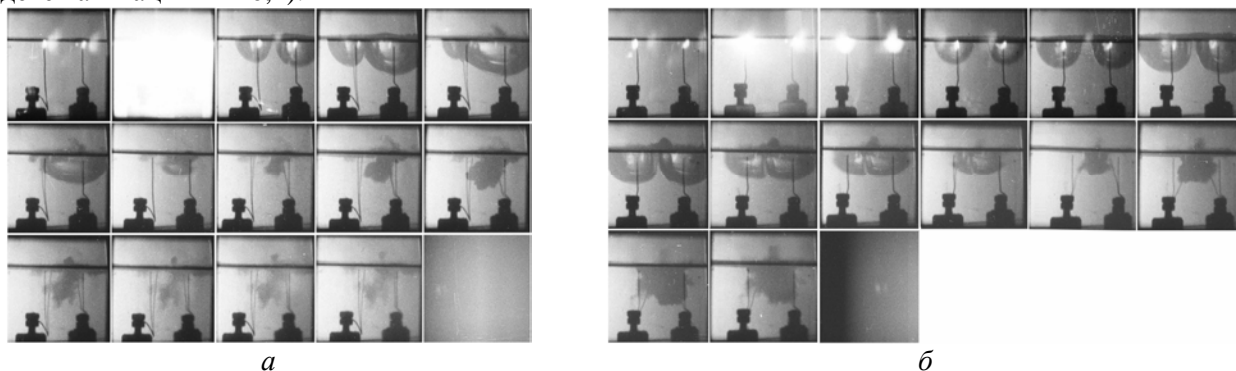


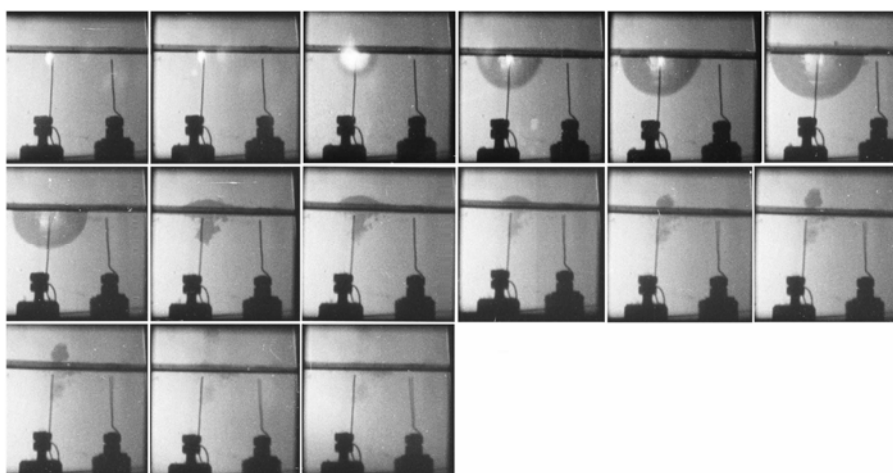
Рис. 5. Элементы управления кавитационной областью при параллельных электрических разрядах: а – со значительной задержкой пуска одного из разрядов ( $\Delta t = 8$  мкс); б – строго синхронных ( $\Delta t = 0$ ) при рабочем напряжении  $U_1 = 17,8$  кВ (кадры 11–14)

На рис. 6 приведены фоторегистрограммы зарождения и развития кавитационной области в воде, порожденной одиночными разрядами при существенно измененных условиях. Рис. 6,а соответст-

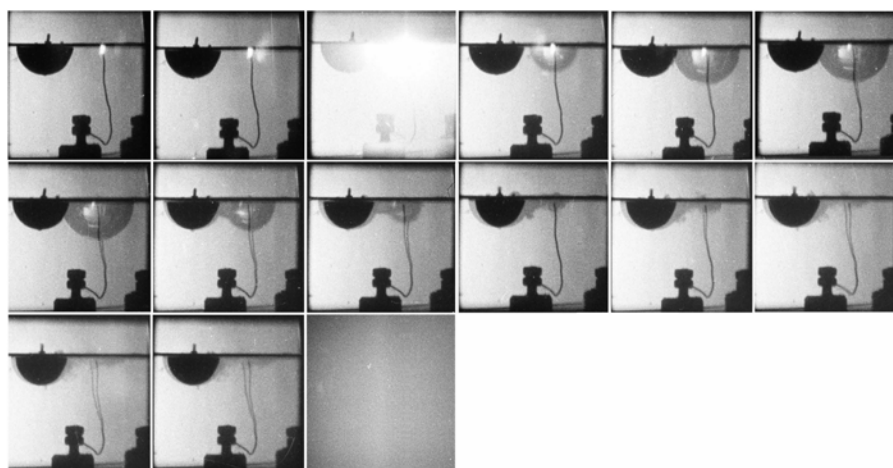
вует разряду в параллельных электродных системах, но когда второй разряд отсутствует, рис. 6,б – разряду в параллельных электродных системах, но когда второй разряд отсутствует, но в его зоне установлена твердая, полая полусфера, имеющая размеры соответствующей послеразрядной полости.

Как видно из приведенной фоторегистрограммы (см. рис. 6,а), даже хорошо развивающийся подводный одиночный разряд (в такой же параллельной электродной системе, как и рассмотренные выше) не приводит к возбуждению заметной кавитационной области. Возникает лишь небольшая кавитация у оконечности электрода после захлопывания послеразрядной полусферы (кадры 8–13). В этой кавитационной области индекс кавитации  $K \approx 0,05$ .

В случае наличия вблизи одиночного подводного разряда полой, твердой полусферы с размерами, равными усредненному размеру послеразрядной полости параллельного разряда, кавитационная картина существенно отличается от кавитации свободного одиночного разряда. Как только послеразрядная полость, достигнув максимальных размеров, начинает коллапсировать (кадр 8), в нее устремляется окружающая жидкость со скоростью, достаточной для возбуждения кавитации в прилегающих к полусфере слоях жидкости. Часть этого потока жидкости притекает в зону захлопнувшейся послеразрядной полости-полусферы (кадры 9–12), образуя также малую кавитационную область с центром в разрядном промежутке.



а



б

Рис. 6. Минимизация кавитационной области между тонкими стержневыми электродами при одиночных разрядах: а – с параллельными стержнями; б – с установкой твердой, полой полусферы в мнимом центре генерирования второй послеразрядной полости

Одновременно некоторое количество кавитационных пузырьков образуется и в слоях воды, создающих присоединенный слой при всей поверхности твердой полусферы (кадры 8–14).

Следует отметить, что при достаточно быстром расширении послеразрядной полости расходящиеся потоки жидкости не вызывают кавитации у твердой полусферы (кадры 4–7). Это свя-

зано с тем, что в этих потоках жидкость находится в сжатом состоянии, в ней отсутствуют растягивающие напряжения.

В целом же кавитирующий объем жидкости при одиночном разряде и наличии полусферы-имитатора сравним с объемом кавитации, возникающей при свободном линейном разряде, хотя форма и геометрия такой кавитационной области более применимы в практических целях.

### **Выводы**

Приведенные экспериментальные данные позволяют утверждать, что в свободном объеме только параллельные подводные электрические разряды являются генераторами мощных кавитационных областей.

Интенсивность кавитации в таких кавитационных областях сильно зависит от синхронности инициирования параллельных разрядов и их послеразрядных парогазовых полостей, а также от величины рабочего напряжения в разрядных контурах. Таким образом, описанный вид электроразрядной кавитации является управляемым.

Совершенно такие же энергетически, но одиночные электрические разряды не приводят к возникновению мощных кавитационных областей.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Малюшевский П.П., Малюшевская А.П., Левда В.И.* Электровзрывная нелинейная, объемная кавитация в технологических реакторах. Часть 1. (Электроразрядное генерирование газовой фазы–зародышей кавитации) // *Электронная обработка материалов.* 2004. № 1. С. 46–53.
2. *Малюшевский П.П., Малюшевская А.П., Левда В.И.* Электровзрывная нелинейная, объемная кавитация в технологических реакторах. Часть 2. (Анализ структуры кавитационных областей) // *Электронная обработка материалов.* 2004. № 2. С. 40–46.
3. *Малюшевский П.П., Горовенко Г.Г., Петюр Л.Г.* Совмещение подводного электрического взрыва и собственного гидроакустического излучателя. Ч. 1. (Исследование физической эффективности генерирования импульсного акустического поля) // *Электронная обработка материалов.* 2003. № 2. С. 68–75.
4. *Малюшевский П.П., Петюр Л.Г., Катаев Н.М.* Некоторые аномальные характеристики акустического импульса, излучаемого из области взаимодействия трех сходящихся ударных волн // *Электронная обработка материалов.* 1996. № 2–3. С. 40–42.
5. *Малюшевский П.П.* Основы разрядно-импульсной технологии. Киев: Наук. думка, 1983. 272 с.
6. *Вовченко А.И.* Особенности пространственно-временной эволюции парогазовых полостей, генерируемых подводным искровым разрядом /А.И. Вовченко, В.В. Кучеренко, В.В. Шамко // *Журн. прикладной механ. и техн. физ.* 1978. С. 58–64.

*Поступила 18.09.06*

### **Summary**

The experimental results of cavitation researchers in a liquid during underwater synchronous parallel discharges are represented. It's shown, that only synchronous discharges produce wide cavitation territories in free liquid and cavitation's parameters can be controled by working strain diversify.

---