

ДИНАМИКА ГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ ПРИ КОНТАКТНОМ ПОДВОДНОМ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ

В. А. Бурцев, В. В. Кучеренко, В. В. Шамко

(Николаев)

При электрогидроимпульсном разрушении материалов чаще всего [1] используется контактный электровзрыв (ЭВ), когда одним из электродов является обрабатываемый объект. Это приводит к тому, что образующаяся парогазовая полость (ПГП) развивается непосредственно на объекте обработки (твердой стенке), поэтому последний может оказывать влияние как на формируемое в жидкости поле давлений, так и на характер развития ЭВ каверн.

В большинстве теоретических исследований по динамике контактирующих с твердой стенкой каверн [2—5] в качестве модельной задачи рассматривается задача о замыкании сферической [2, 3] или эллипсоидальной [4, 5] полостей. Однако, как показывает опыт [6—10], вследствие первоначального роста полости в асимметричных граничных условиях она подвергается деформациям. Причем возникающие изменения формы могут быть весьма существенными [6, 8], и, следовательно, в соответствии с результатами [4, 5] характер замыкания полости непредсказуемым. Поэтому в данной работе предпринята попытка экспериментального исследования динамических особенностей генерируемой при контактном ЭВ полости с целью выяснения вклада этой стадии процесса в механизм разрушающего действия контактного ЭВ и поиска путей интенсификации технологических процессов, использующих этот тип ЭВ.

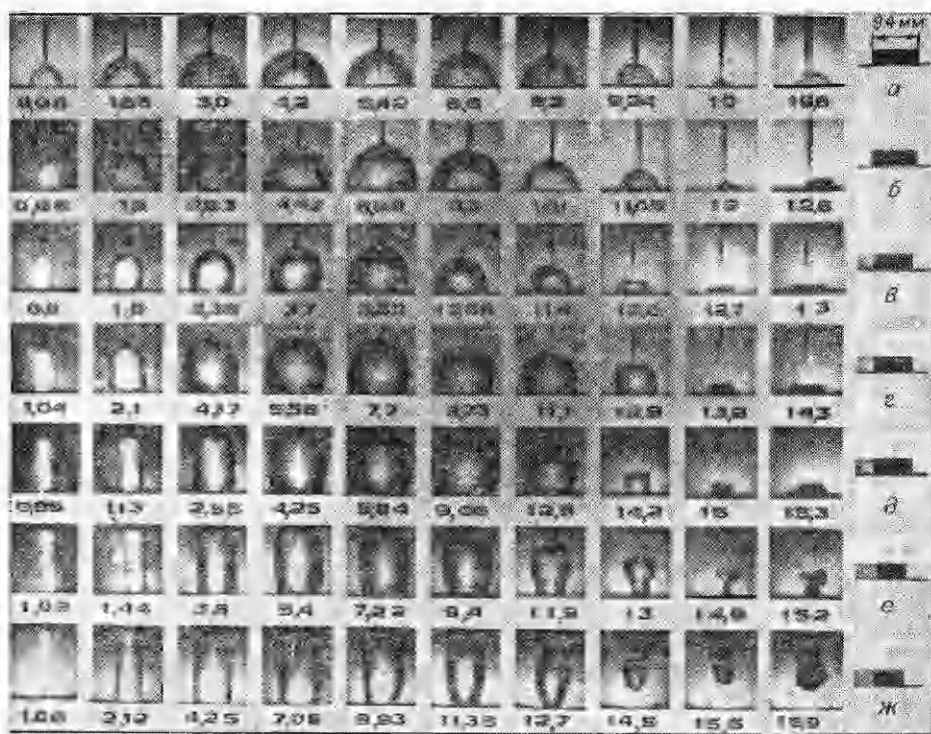
Для удобства проведения эксперимента варьировалась длина разрядного промежутка l при фиксированных остальных параметрах: напряжении пробоя $U_0 = 50$ кВ, емкости накопительной батареи $C = 10^{-6}$ Ф, индуктивности $L = 4,3 \cdot 10^{-6}$ Г, проводимости жидкости $\sigma = 0,005$ (Ом·м) $^{-1}$, эквивалентном активном сопротивлении контура $R_d = 0,1$ Ом, определяемом по кривой тока для короткозамкнутого разрядного промежутка. Стабилизация процесса осуществлялась путем инициирования разряда медным проводником диаметром 0,05 мм. Динамическая картина развития полостей регистрировалась скоростной кинокамерой СФР-2М в режиме лупы времени в соответствии с методикой, изложенной в [6, 8], и в зависимости от длины разрядного промежутка представлена серией фотограмм на фиг. 1 (справа каждой фотограммы приведен пространственный масштаб $b = 94$ мм, время экспозиции $\sim 0,2-0,4$ мс).

Если при отсутствии контактной поверхности разлет плазменного цилиндра в воде с аналогичными энергетическими параметрами сопровождается превращением его в пульсирующую полость квазисферической формы [11], то в случае контактного взрыва эволюция этого процесса имеет более сложный характер: наблюдается формирование полостей в виде сферического сегмента (см. фиг. 1, а, б), куполообразной (фиг. 1, в—е) или квазицилиндрической формы (фиг. 1, ж).

Экстремальные амплитудно-частотные параметры процесса приведены в таблице (номер строки таблицы соответствует порядковому обозначению серии фотограмм фиг. 1, т. е. 1 — а, 2 — б и т. д.).

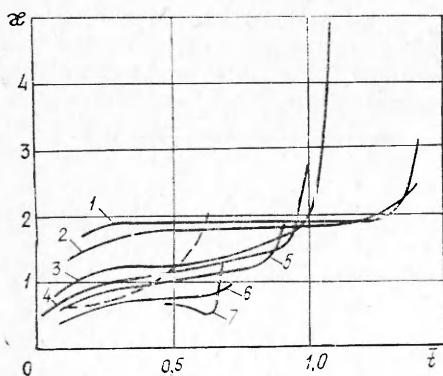
В качестве обобщенного параметра, характеризующего форму каверны, как и в [4, 5, 9, 10], выбирался коэффициент ее деформации $\kappa = 2a/h$ (h — длина оси, перпендикулярной плоскости, т. е. оси симметрии [8], а $2a$ — длина оси, параллельной плоскости).

Номер режима разряда	$l, \text{ м}$	κ^*	$T \cdot 10^3, \text{ с}$	$V_{\text{max}} \cdot 10^3, \text{ м}^3$	Номер режима разряда	$l, \text{ м}$	κ^*	$T \cdot 10^3, \text{ с}$	$V_{\text{max}} \cdot 10^3, \text{ м}^3$
1	0,01	1,92	10,0	0,7	5	0,10	0,98	15,0	3,3
2	0,025	1,72	12,0	1,0	6	0,15	0,72	14,8	3,4
3	0,05	1,28	12,7	1,6	7	0,20	0,60	15,6	—
4	0,075	1,11	13,9	2,0					



Ф и г. 1

Анализ временной зависимости степени деформации (фиг. 2, номера кривых соответствуют порядковому номеру режима ЭВ в таблице) показывает, что лишь в области сильно колебательных (при малых l) режимов ЭВ пузырь имеет вполне определенную (квазиполусферическую) геометрическую форму. По мере приближения режима разряда к критическому ($l \rightarrow 0,2$ м) форма полости деформируется и напоминает скорее искаженный со стороны стенки в радиальном направлении круговой цилиндр с верхней насадкой в виде сферического сегмента (см. также фиг. 1). Выделить в этом случае, как в [3], угол контакта ПГП с твердой стенкой из-за искажений, связанных с влиянием вязкости жидкости и асимметрии течения, не представляется возможным. Общим для всех режимов ЭВ является преимущественное радиальное расширение полостей (первая возрастающая часть кривых $\kappa(t)$). Затем с ростом l область стабильности формы уменьшается, а на заключительной стадии наблюдается ускоренное осевое сжатие. Явный отход от отмеченного характера поведения $\kappa(t)$ наблюдается лишь для кривой 7, когда в процессе замыкания полости наблюдается заметный (тенденция спада уже обнаруживается у кривой 6)



Ф и г. 2

спад коэффициента κ , а затем к концу пульсации весьма быстрый его рост, связанный с пересжатием полости в области шейки. Характерно, что κ для ЭВ полости эллипсоидальной формы (штриховая кривая для энергии ЭВ, приходящейся на единицу длины канала 7,4 кДж/м) при отсутствии твердой стенки отличается от близких ей по режиму взрыва кривых 5, 6 лишь на заключительной стадии коллапса, что связано с более быстрым осевым (с обоих торцов в отличие от контактного ЭВ) сжатием полости.

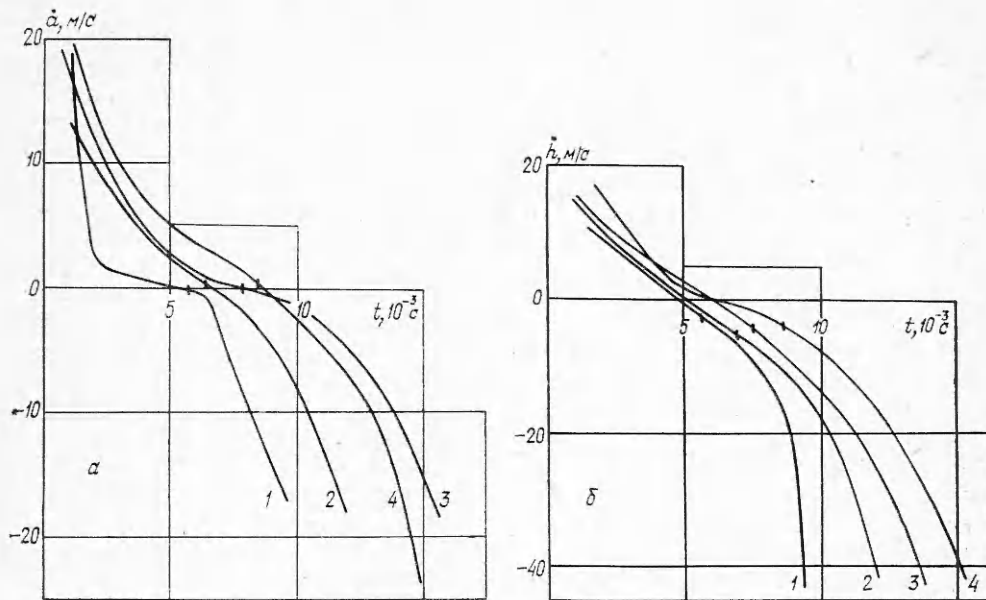
Обозначим через κ_* степень деформации в момент достижения полостью максимального объема V_{\max} , который характеризует стадию схлопывания. В качественном плане характер замыкания каверн при контактном ЭВ (особенно при $\kappa_* \leq 0,7$) напоминает коллапс сплюснутых эллипсоидальных полостей (с $\kappa_* > 1,3$), контактирующих с твердой стенкой [5, 9]. Однако в данном случае длина шейки существенно больше и простирается практически до стенки, а ее скорость сжатия меньше. Кроме того, при контактном ЭВ отсекается основная часть пузыря, а к стенке примыкает его малая часть.

При $\kappa_* > 0,72$ полость замыкается у преграды и разбивается потоком лишь на заключительных стадиях, а при $\kappa_* = 0,72$ полость по мере приближения к минимальному объему вытягивается вдоль оси симметрии и в этот же период кумулятивная струя (формирование последней фиксировалось по прогибу поверхности полости) проникает внутрь полости. При $\kappa_* < 0,72$ полость уже замыкается не на твердой стенке, а в пространстве между стенкой и положительным электродом, что может приводить, с одной стороны, к увеличению интенсивности воздействия на стенку излучаемой при схлопывании вторичной ударной волны и значительному ослаблению силового воздействия потока жидкости на стадии коллапса — с другой. При достижении коэффициентом деформации значения $\kappa_* = 0,62$ формируемая с торца полости основная струя уже не достигает преграды; максимальная скорость этой струи, зарегистрированная в опытах, составляла 32 м/с и достигалась при $t = 0,8 T$, где T — период пульсации полости.

По мере изменения режима ЭВ (уменьшения κ_*) наблюдается все более четкое формирование шейки на нижней ($\sim 0,1h^*$) части полости, связанное с действием сил вязкости, тормозящих поток жидкости вблизи преграды. На стадии сжатия полости образуется кольцевая струя, движущаяся со скоростью $\sim 25-30$ м/с, в процессе захлопывания которой происходит более интенсивное по сравнению с общим радиальным сжатием полости замыкание шейки. Зарегистрированное в опыте максимальное значение превышения скорости шейки над радиальной скоростью \dot{a} достигало 5 и наблюдалось для режима с $\kappa_* = 0,72$.

Характерной особенностью развития каверн при контактном ЭВ является отставание по фазе смещений боковых и торцевой поверхностей полости (фиг. 3, а, б, где кривые 1—4 соответствуют $\kappa = 1,9; 1,3; 0,6; 1$). Видно, что в момент достижения V_{\max} не все участки свободной поверхности перемещаются в одинаковых направлениях (момент достижения V_{\max} отмечен на кривых вертикальной чертой). Поэтому такие понятия, как расширение и сжатие полости, имеют смысл применительно к изменениям объема, а не отдельных ее линейных размеров. Такая же ситуация наблюдается и при ЭВ в открытом объеме [8], но при значительно меньшей энергоемкости, когда полости имеют эллипсоидальную форму.

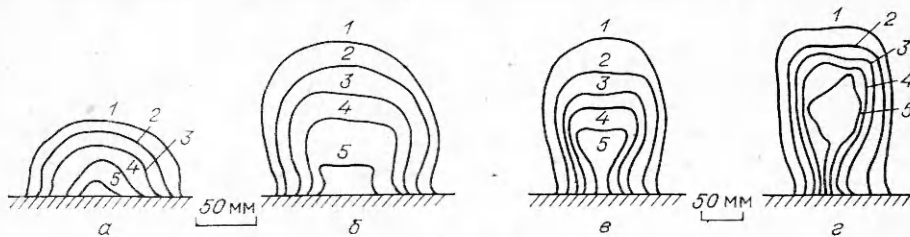
Анализ зависимостей $\dot{a}(t)$ и $\dot{h}(t)$ свидетельствует об отсутствии симметрии этих кривых относительно временной оси, а соответственно и об асимметричности кривых $a(t)$ и $h(t)$ относительно их максимума. Кроме того, уже простое сопоставление семейства кривых $\dot{a}(t)$ и $\dot{h}(t)$ показывает, что на стадии расширения величины рассматриваемых скоростей для различных режимов ЭВ отличаются незначительно (кривые лежат густо), в то время как на стадии сжатия наблюдается существенное различие в значениях скоростей (аналогичная картина наблюдается и для скоростей шейки). Следовательно, процесс замыкания полостей при контактном ЭВ сильнее зависит от исходной степени деформации κ_* , чем расширение. Так, уже небольшие изменения κ_* (особенно в области $\kappa_* \approx 1$) приводят не только к заметному изменению интенсивности, но и схемы замыкания, тогда как в схеме расширения существенных изменений не происходит. Действительно, при контактном ЭВ, как следует из фиг. 4, на которой изображены положения границы пузыря в последовательные моменты времени



Ф и г. 3

$\bar{t} = t/h_* \sqrt{\Delta p/\rho}$ (ρ — плотность жидкости, Δp — разность между гидростатическим давлением и давлением в полости в максимуме, $\Delta p \approx 10^5$ Па) для степеней деформаций (а — $\kappa_* = 1,92$, $\bar{t} = 0,71$; 1,11; 1,24; 1,37; 1,44 (линии 1—5 соответственно); б — $\kappa_* = 0,98$, $\bar{t} = 0,47$; 0,67; 0,78; 0,85; 0,92 (линии 1—5 соответственно); в — $\kappa_* = 0,72$, $\bar{t} = 0,34$; 0,57; 0,64; 0,67; 0,71 (линии 1—5 соответственно); г — $\kappa_* = 0,62$, $\bar{t} = 0,35$; 0,54; 0,61; 0,64; 0,67 (линии 1—5 соответственно), наблюдаются две особенности: область, занятая полостью, остается односвязной (т. е. не происходит деления пузырька на части) в течение всего процесса замыкания ($\kappa_* > 1$), и связность области в какой-то момент времени нарушается ($\kappa_* < 1$) — происходит отделение пузырька. Причем с уменьшением степени деформации κ_* процесс формирования кольцевой струи и деления полости на части сдвигается в сторону меньших времен, а объем отделяемого пузырька и его удаленность от стенки возрастают. Максимальная скорость кольцевой струи достигается к концу процесса замыкания, несколько возрастая с уменьшением степени деформации. При переходе через $\kappa_* = 1$ тип коллапса полости изменяется, и, следовательно, для полостей, индуцируемых при контактном ЭВ, $\kappa_* = 1$ является критическим значением степени деформации.

Характер замыкания квазиполусферического пузырька на твердой стенке (см. фиг. 1, а) в значительной степени отличается от замыкания сферического или квазисферического [4—6]. В частности, в отличие от [4, 5] в данном случае не наблюдается формирования кумулятивной струи на ранней стадии замыкания, процесс замыкания квазиполусферического пузырька происходит в основном путем его всестороннего сжатия, а асиммет-



Ф и г. 4

ричность течения жидкости сказывается лишь на заключительных стадиях коллапса.

Сопоставление полученных значений скоростей движения боковой и торцевой поверхностей, а также кольцевой струи показывает, что практически для всех рассматриваемых режимов (исключая режим с $\kappa_* = 0,62$) максимальная скорость достигается в направлении, перпендикулярном твердой стенке.

Следует отметить, что в начале каждого цикла пульсации полости наблюдается объемная акустическая кавитация жидкости, вызванная излучением первичной и вторичной ударных волн. Однако для колебательных режимов разряда ввиду большей яркости плазменного канала пульсирующие кавитационные пузырьки практически не просматриваются, в то время как для разрядов, близких к критическому, процесс кавитации наблюдается вполне отчетливо (см. фиг. 1, ∂ —ж).

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволяют уяснить динамические особенности развития генерируемых контактным электровзрывом полостей и выявить три характерных типа их коллапса: замыкание полостей на твердой стенке ($\kappa_* \geq 0,8$), отсекаание значительной части полости от твердой стенки с сохранением контакта через перемычку ($0,6 < \kappa_* < 0,8$) и замыкание полости вне твердой стенки ($\kappa_* \leq 0,6$).

Кроме того, ввиду качественной аналогии в схемах замыкания кавитационных пузырьков на твердой стенке и полостей при контактном ЭВ последний может использоваться в качестве удобной модели для изучения кавитации на твердых поверхностях благодаря быстрой и легкости регулировки мощности и геометрии каверны, а также многократности его повторения.

Поступила 13 VIII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта/Под ред. Г. А. Гулого. М.: Машиностроение, 1977.
2. Plesset M. S., Chapman R. B. Collapse of initially spherical cavity in the neighbourhood of a solid boundary.— J. Fluid Mech., 1971, vol. 47, pt 2.
3. Shima A., Sato G. The collapse of a bubble attached to a solid wall.— Ingenieur Archiv, 1979, vol. 48, N 2.
4. Воинов В. В., Воинов О. В. Расчет параметров скоростной струи, образующейся при захлопывании пузыря.— ПМТФ, 1979, № 3.
5. Воинов О. В., Воинов В. В. О схеме захлопывания кавитационного пузырька около стенки.— ДАН СССР, 1976, т. 227, № 1.
6. Бурцев В. А., Шамко В. В. Замыкание сферической полости, индуцированной подводной искрой, вблизи твердой стенки.— ПМТФ, 1977, № 1.
7. Kling C. L., Hammitt F. G. A photographic study of spark-induced cavitation bubble collapse.— Transactions of the ASME. Ser. D., Journal of basic engineering, 1972, vol. 4, p. 130.
8. Шамко В. В., Вовченко А. И. Влияние граничных поверхностей на развитие парогазовой полости при подводном искровом разряде.— В сб.: Гидромеханика. Киев: Наукова думка, 1976, вып. 34.
9. Grivnin G. A., Zubrilov S. P., Larin V. A., Shalnev K. K. The investigation of the collapse mechanism of the nonspheric cavitation recesses in liquids with different physical properties.— In: Proc 6 th Conf. Fluid Mech. Vol. 1, Budapest, 1979.
10. Гривнин Ю. А., Зубрилов С. П., Ларин В. А. Влияние физических свойств жидкости на пульсацию и разрушение несферических кавитационных полостей.— ЖФХ, 1980, т. 54, № 1.
11. Вовченко А. И., Кучеренко В. В., Шамко В. В. Особенности пространственно-временной эволюции парогазовых полостей, генерируемых подводным искровым разрядом.— ПМТФ, 1978, № 6.