

Влияние объема цилиндрической разрядной камеры с жесткими стенками на поле давления в заполняющей ее воде

В. М. Косенков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: v.m.kosenkov@gmail.com

Поступила в редакцию 29.06.2021

После доработки 27.10.2021

Принята к публикации 29.10.2021

Объем разрядной камеры имеет большое влияние на поле давления в заполняющей ее воде и на эффективность многих технологических процессов, поэтому исследование связи между объемом камеры и давлением в ней является актуальной задачей. Однако мало изучена роль объема разрядной камеры в формировании поля давления. Ее определение – цель данной работы. Исследование выполнено на основе разработанной ранее математической модели электрического разряда в воде, адекватность которой подтверждена на основе сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Установлено, что замкнутый объем разрядной камеры с жесткими стенками существенно влияет на формирование поля давления в заполняющей ее воде. При этом решающее значение имеет взаимодействие волн, отраженных от стенок разрядной камеры, с поверхностью канала разряда в воде и парогазовой полости. Отраженные волны определяют период и амплитуду пульсации канала разряда и парогазовой полости, оказывая влияние на электрические характеристики разряда, которое усиливается при уменьшении объема камеры.

Ключевые слова: электрический разряд в воде, математическое моделирование, канал разряда, парогазовая полость, поле давления, разрядная камера

УДК 537.528: 519.6:621.314

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.68>

ВВЕДЕНИЕ

В ряде работ [1–13] отмечено, что объем разрядной камеры существенно влияет на поле давления, формируемое электрическим разрядом в воде, но эти данные имеют отрывочный характер и не позволяют определить общие закономерности изменения поля давления от объема камеры. Отсутствие таких данных ограничивает возможности целенаправленной разработки электроразрядных технологий [14, 15], что снижает их эффективность. Эти обстоятельства свидетельствуют об актуальности исследований влияния объема разрядной камеры на поле давления в ней.

Наиболее эффективным способом определения такой закономерности является математическое моделирование [1, 3–5, 9, 11–13]. Разработанная математическая модель [11, 12] определяет связь между всеми элементами разрядной цепи и разрядной камеры и характеризуется высокой степенью адекватности происходящим физическим явлениям. Поэтому ее использование позволяет получить наиболее полную информацию об изменении поля давления в разрядной камере в зависимости от изменения

ее объема, что является основной целью исследования в данной работе.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Поле давления исследовали в разрядной камере с жесткими цилиндрическими стенками, схема которой приведена на рис. 1. Оси электродов, между которыми формировался канал разряда, совпадают с осью камеры, что обеспечивает осевую симметрию поля давления и упрощает процесс его анализа, не препятствуя при этом обобщению полученных результатов.

Полость 1 разрядной камеры с жесткими стенками 2 заполнена водой. Высоковольтный 3 и низковольтный 4 электроды включены в разрядный контур 5, содержащий конденсаторную батарею емкостью C и воздушный разрядник 6. Элементы разрядного контура 5, кроме канала разряда 7, характеризуются активным сопротивлением R_{sh} и индуктивностью L . Конденсаторную батарею заряжали до напряжения U_0 , после которого происходит замыкание цепи через разрядник 6, и напряжение подается на электроды 3 и 4. Под действием напряжения U_0 происходит электрический пробой жидкости между электродами 3 и 4,

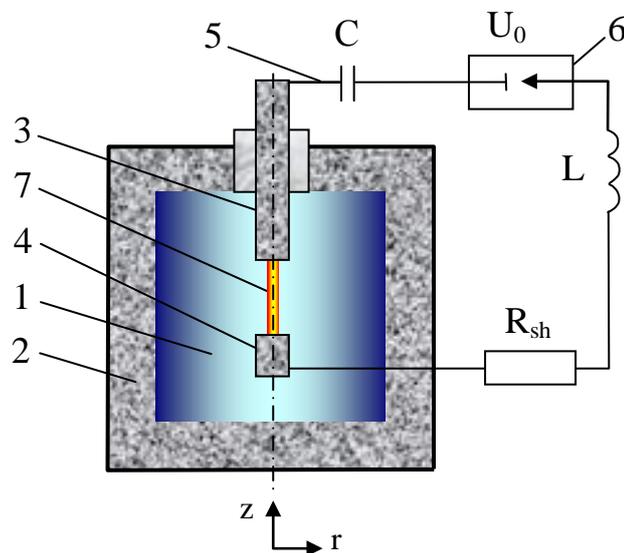


Рис. 1. Схема моделируемой системы: 1 – полость разрядной камеры, заполненная водой; 2 – корпус разрядной камеры; 3 – высоковольтный электрод; 4 – низковольтный электрод; 5 – разрядный контур; 6 – воздушный разрядник; 7 – канал разряда; C – емкость конденсаторной батареи; U_0 – напряжение заряда конденсаторной батареи; L – индуктивность разрядного контура; R_{sh} – сопротивление элементов разрядного контура (без канала разряда).

который инициирует электрический разряд и образование канала разряда 7. Энергия, запасаемая в конденсаторной батарее емкостью C , выделяется в канале 7 и приводит к его расширению в результате повышения в нем давления. Вследствие этого в воде формируются и распространяются ударные волны, которые испытывают дифракцию на стенках разрядной камеры 2, а также на электродах 3 и 4. В результате взаимодействия образовавшейся системы волн происходят их интерференция и дифракция на канале разряда 7, а впоследствии на парогазовой полости, формируя переменное во времени поле давления в разрядной камере.

Основная задача данной работы состоит в определении соотношения между изменяющимся с течением времени полем давления в разрядной камере и ее объемом.

В процессе исследования полагали, что канал разряда расположен в центре разрядной камеры при любых ее размерах. Принимали, что длина полости разрядной камеры равна ее диаметру независимо от их величин. При этом расстояние между электродами ($l = 30$ мм) и их диаметр ($d_e = 16$ мм) оставались неизменными. Также постоянными оставались параметры разрядного контура. Емкость конденсаторной батареи (C) равна 10 мкФ, индуктивность разрядной цепи (L) – 9,3 мкГн, напряжение заряда батареи (U_0) – 30 кВ, активное сопротивление элементов разрядного контура без канала разряда (R_{sh}) – 0,09 Ом. Инициирование разряда выполняли пробоем слоя воды между электродами после приложения к ним разности потенциалов U_0 . При таких условиях поле давления в разрядной камере зависело только от изменения ее объема.

Изменение поля давления в разрядной камере характеризовали давлением плазмы в канале разряда (P_{ch}), средним давлением воды в полости разрядной камеры (P_{cb}), а также средними давлениями на цилиндрической (P_s) и плоских (P_d) стенках камеры. По величинам P_s и P_d вычисляли средние по площади удельные импульсы давления (L_s) и (L_d) на цилиндрическую и плоские стенки разрядной камеры, соответственно.

Для исследования использовали математическую модель электрического разряда в воде [11, 12, 16], в которой учтены процессы в разрядном контуре, канале разряда и окружающей его жидкости, заполняющей замкнутую разрядную камеру цилиндрической формы. В предлагаемой работе модель [12] дополнена соотношениями, позволяющими существенно повысить точность вычисления сопротивления канала разряда после первой четверти периода колебания тока в разрядной цепи, используя уравнение для удельной электропроводности плазмы и другие замыкающие соотношения [11] вместо определения сопротивления канала разряда на основе изменения удельной внутренней энергии плазмы [17].

Сравнение результатов, полученных по математической модели [11, 12, 16], модифицированной в данной работе, с результатами экспериментов [18, 19] показало их удовлетворительное согласование по силе тока в разрядной цепи, напряжению на канале разряда, его активному сопротивлению, мощности ввода в него энергии и выделившейся в нем энергии. Это свидетельствует об адекватности предлагаемой модификации математической модели

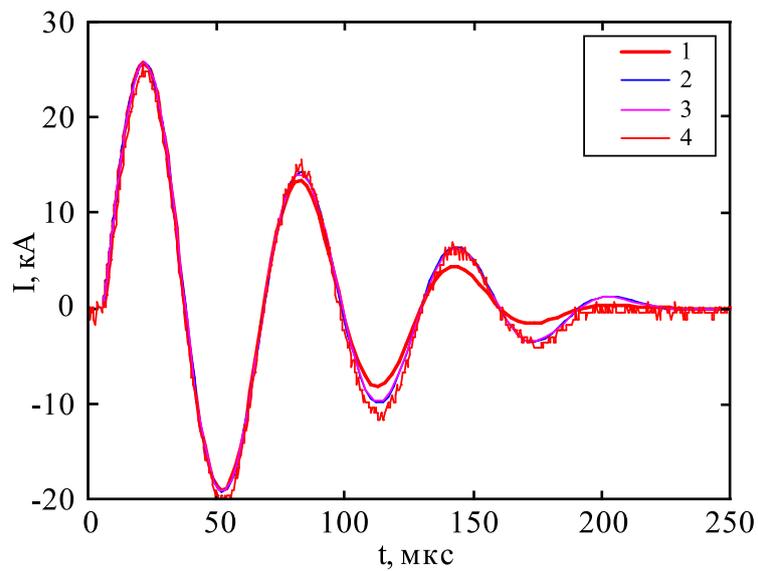


Рис. 2. Сила тока в канале разряда: 1 – $R_{cb} = 30$ мм (расчет); 2 – $R_{cb} = 60$ мм (расчет); 3 – $R_{cb} = 120$ мм (расчет); 4 – $R_{cb} = 60$ мм (эксперимент).

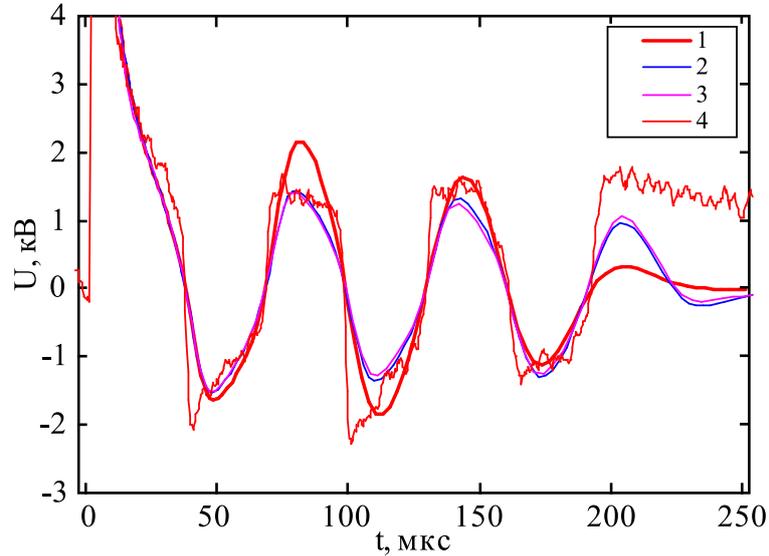


Рис. 3. Напряжение на канале разряда: 1 – $R_{cb} = 30$ мм (расчет); 2 – $R_{cb} = 60$ мм (расчет); 3 – $R_{cb} = 120$ мм (расчет); 4 – $R_{cb} = 60$ мм (эксперимент).

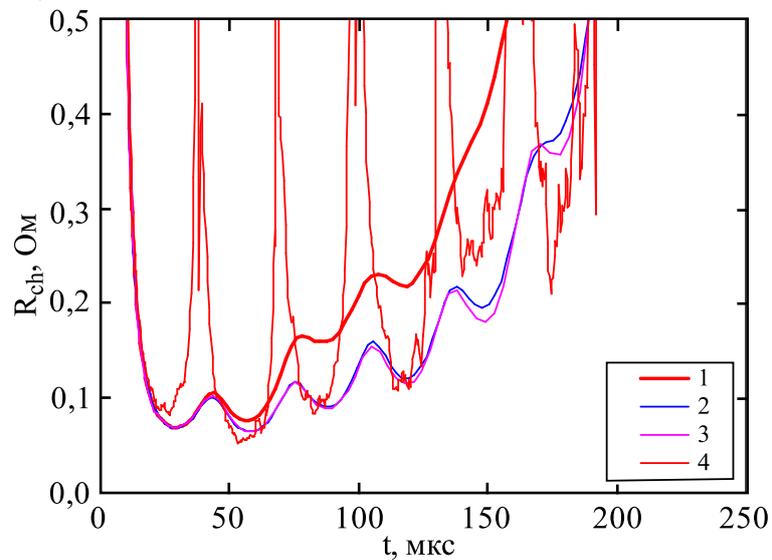


Рис. 4. Сопротивление канала разряда: 1 – $R_{cb} = 30$ мм (расчет); 2 – $R_{cb} = 60$ мм (расчет); 3 – $R_{cb} = 120$ мм (расчет); 4 – $R_{cb} = 60$ мм (эксперимент).

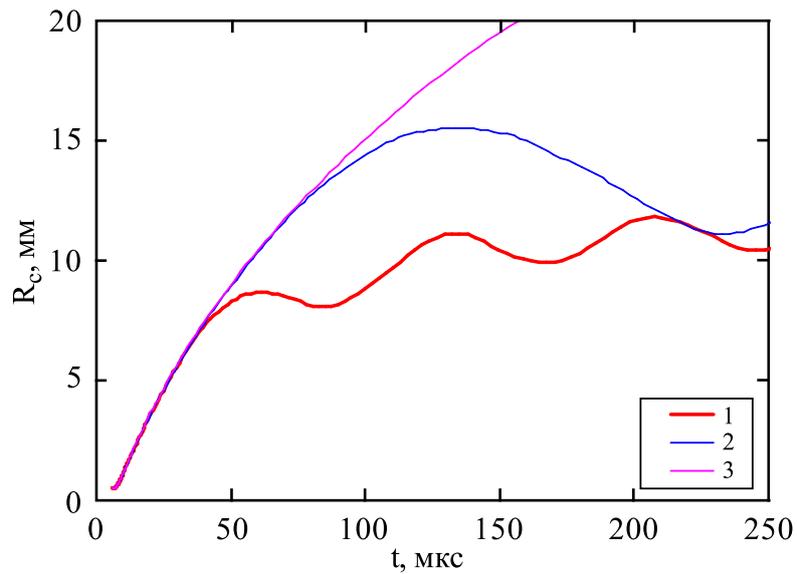


Рис. 5. Радиус канала разряда на половине его длины (расчет): 1 – $R_{cb} = 30$ мм; 2 – $R_{cb} = 60$ мм; 3 – $R_{cb} = 120$ мм.

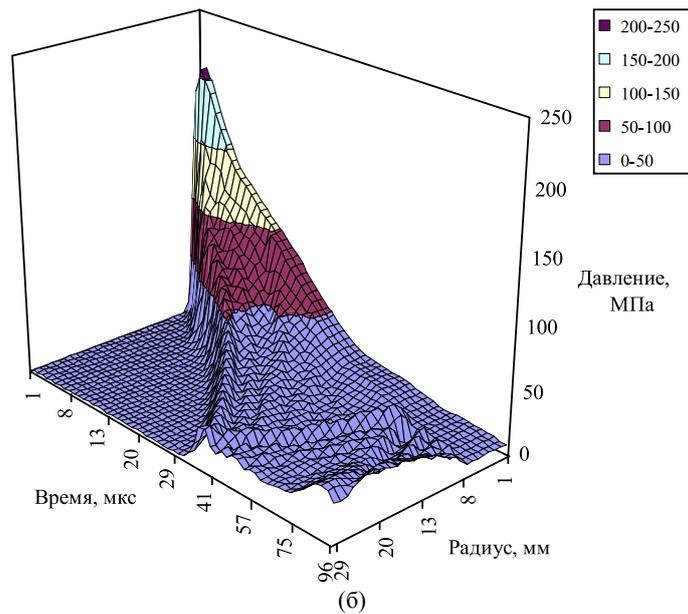
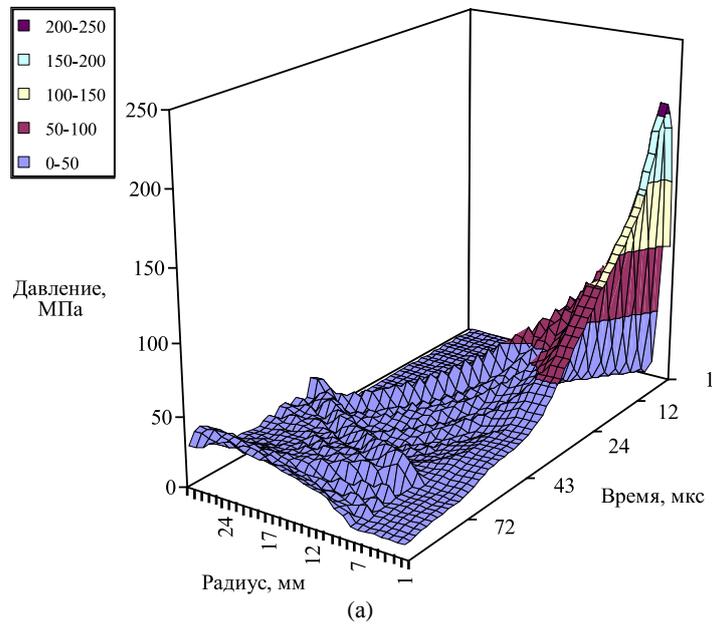


Рис. 6. Пространственно-временное распределение давления в разрядной камере в плоскости, перпендикулярной оси канала, проходящей через середину его длины: (а) – вид со стороны оси канала разряда, (б) – вид со стороны цилиндрической поверхности разрядной камеры ($R_{cb} = 60$ мм).

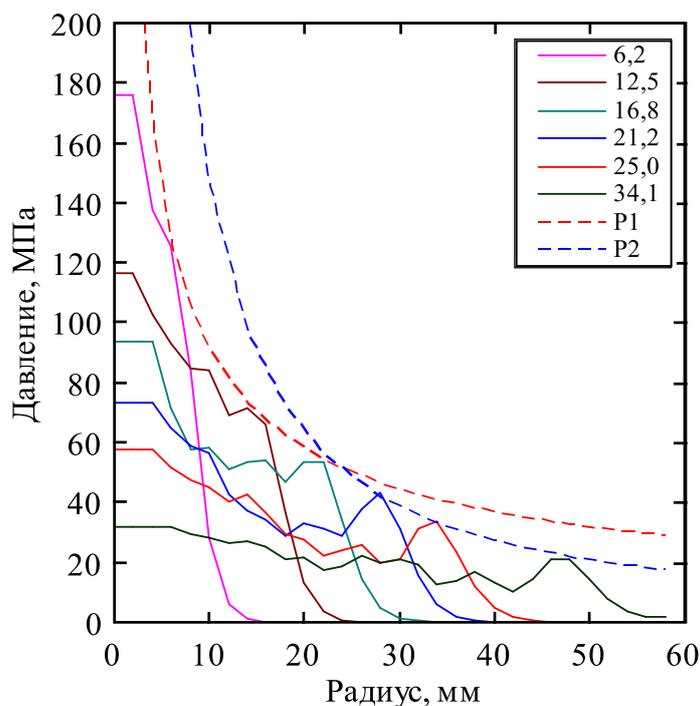


Рис. 7. Профили ударной волны в плоскости, перпендикулярной оси канала, проходящей через середину его длины ($R_{cb} = 60$ мм): P1 – огибающая максимумов давления без учета дифракции волн на электродах; P2 – огибающая максимумов давления с учетом дифракции волн на электродах; линии профилей волн обозначены моментами времени (в мкс), для которых они определены.

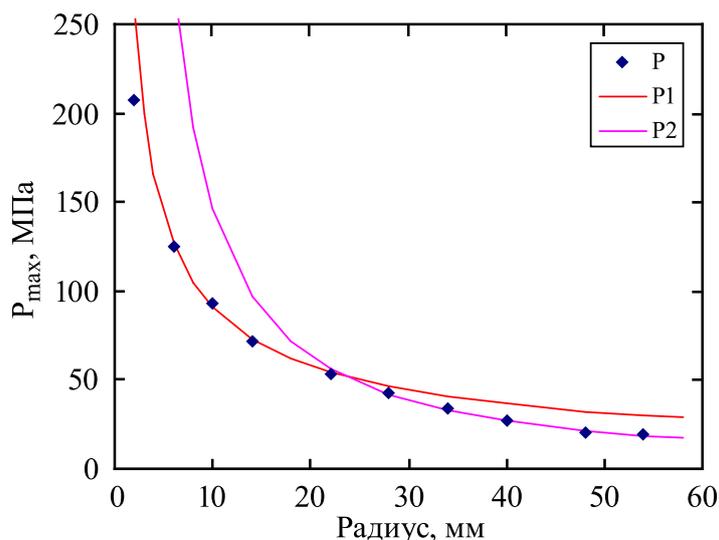


Рис. 8. Огибающие максимумов на фронте ударной волны в плоскости, перпендикулярной оси канала, проходящей через середину его длины ($R_{cb} = 60$ мм): P – максимумы давления на фронте ударной волны; P1 – без учета дифракции волн на электродах; P2 – с учетом дифракции волн на электродах.

[11, 12, 16] физическим явлениям, происходящим при электрическом разряде в воде, и возможности ее использования для решения задачи, поставленной в данной работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе исследования длину полости разрядной камеры и ее диаметр (рис. 1) варьировали в пределах от 60 до 240 мм, что приводило к изменению объема камеры (V_{cb}) от 0,17 до 10,86 л. Размеры полости камеры существенно влияют на электрические характеристики разряда в воде (рис. 2–4) на его заклю-

чительной стадии. При заданных параметрах разряда влияние размеров полости и соответственно ее объема на электрические характеристики разряда существенны, когда радиус полости камеры (R_{cb}) менее 60 мм. Это подтверждается сравнением результатов математического моделирования с данными проведенного нами эксперимента при $R_{cb} = 60$ мм (рис. 2–4). Увеличение радиуса полости за пределом 60 мм не приводит к существенному изменению результатов моделирования и их отличию от экспериментальных данных. Связано это с тем, что при $R_{cb} > 60$ мм радиус канала разряда (R_c) в течение большей части активной стадии разряда

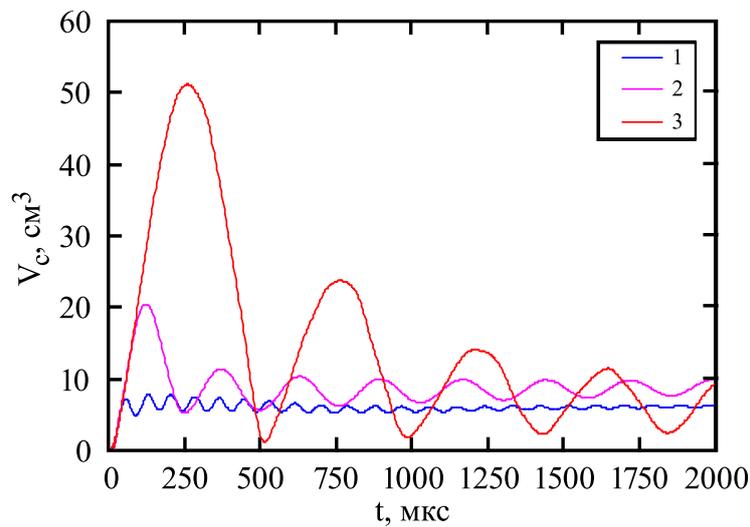


Рис. 9. Объем канала разряда (после завершения разряда парогазовой полости): 1 – $R_{cb} = 30$ мм ($V_{cb} = 0,17$ л); 2 – $R_{cb} = 60$ мм ($V_{cb} = 1,357$ л); 3 – $R_{cb} = 120$ мм ($V_{cb} = 10,857$ л).

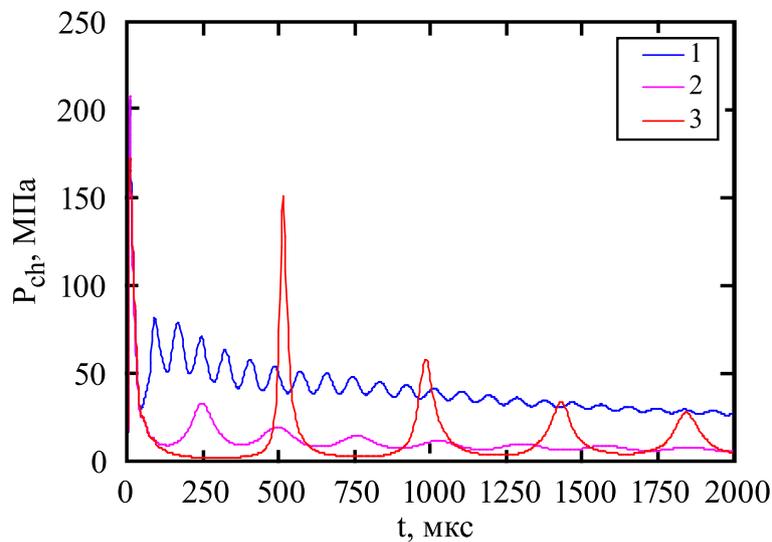


Рис. 10. Давление плазмы в канале разряда (после завершения разряда в парогазовой полости): 1 – $R_{cb} = 30$ мм; 2 – $R_{cb} = 60$ мм; 3 – $R_{cb} = 120$ мм.

изменяется мало (рис. 5). В результате мало изменяются сопротивление канала разряда (R_{ch}) и, как следствие, сила тока (рис. 2) и напряжение на канале разряда (рис. 3).

Зависимость R_c от R_{cb} определяется действием на поверхность канала разряда ударных волн, отраженных от цилиндрической стенки полости разрядной камеры, а также действием отраженных гидродинамических волн, возникающих в результате инерционного движения воды, заполняющей разрядную камеру, между стенками камеры и поверхностью канала разряда (рис. 6). Чем меньше R_{cb} , тем меньше период пульсации канала разряда (рис. 5). Давление в каждой точке пространства, заполненного жидкостью, определяется суперпозицией ударных и гидродинамических волн, длина которых отличается на порядок (рис. 6).

Электроды 3 и 4 (рис. 1) существенно влияют на амплитуду ударной волны в процессе ее

движения от поверхности канала разряда к цилиндрической стенке разрядной камеры (рис. 7 и 8). До прихода волн дифракции к точке пространства, равноудаленной от электродов, зависимость амплитуды ударной волны от расстояния до оси симметрии канала разряда можно аппроксимировать формулой (рис. 7 и 8, линия P1):

$$P^* = 409,77 \times r^{-0,655}, \quad (1)$$

а после прихода волн дифракции (рис. 7 и 8, линия P2):

$$P^* = 2413 \times r^{-1,2187}, \quad (2)$$

где P^* – амплитуда давления на фронте ударной волны, МПа; r – расстояние от точки пространства до оси симметрии канала разряда, м. Для заданных параметров разряда формула (1) справедлива при $r < 23$ мм, а формула (2), когда $r \geq 23$ мм. В результате интерференции с

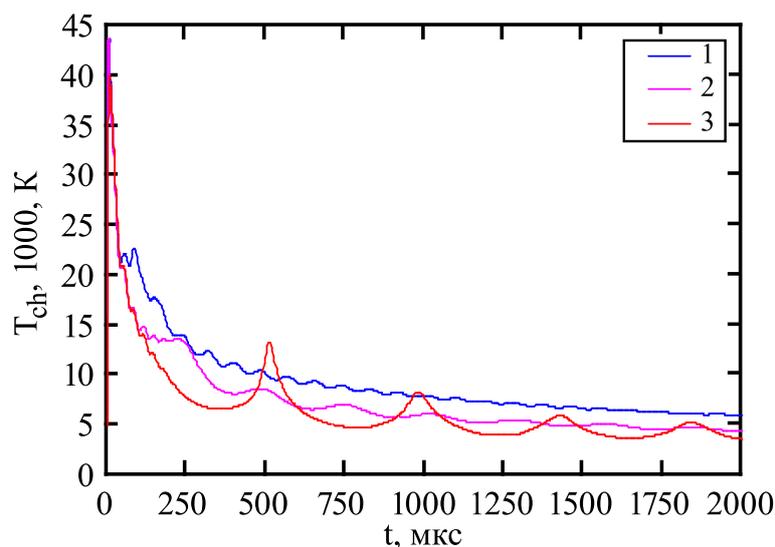


Рис. 11. Температура плазмы в канале разряда (после завершения разряда в парогазовой полости): 1 – $R_{cb} = 30$ мм; 2 – $R_{cb} = 60$ мм; 3 – $R_{cb} = 120$ мм.

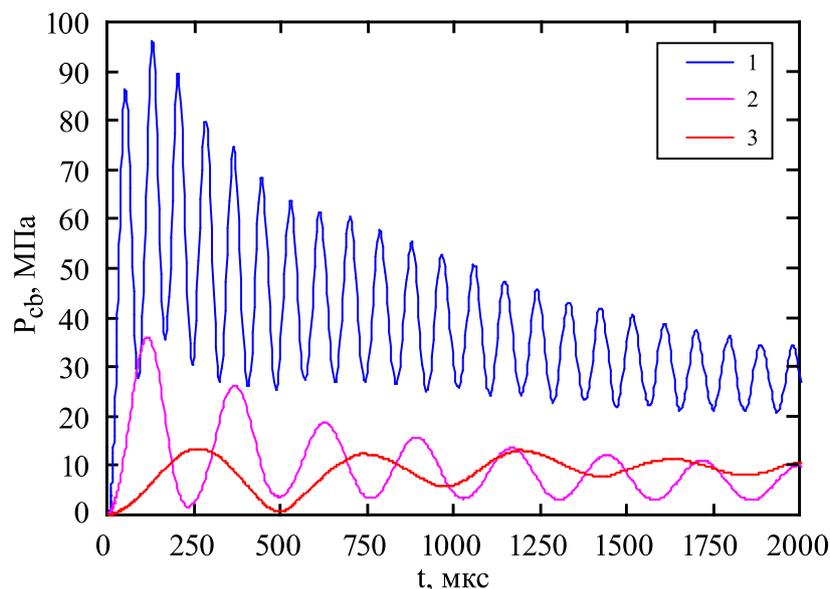


Рис. 12. Среднее давление в воде, заполняющей разрядную камеру: 1 – $R_{cb} = 30$ мм; 2 – $R_{cb} = 60$ мм; 3 – $R_{cb} = 120$ мм.

волнами дифракции амплитуда давления на фронте ударной волны существенно уменьшается (рис. 7 и 8).

Изменение объема канала разряда (после завершения разряда – парогазовой полости) существенно зависит от объема полости разрядной камеры (рис. 9). Первый максимум объема канала разряда (V_c) увеличивается приблизительно в 2,5 раза, если объем полости разрядной камеры (V_{cb}) увеличивается в 10 раз. При этом период пульсации парогазовой полости увеличивается приблизительно от 2 до 3 раз. Первый максимум V_c наибольший, если период его пульсации больше времени протекания тока в канале разряда (рис. 9, линии 2 и 3), иначе он может быть меньше, чем во втором периоде пульсации (рис. 9, линия 1), из-за того, что в момент первого максимума V_c не вся энергия выделилась в канале разряда. Увеличение V_{cb}

приводит к возрастанию отличия максимальных и минимальных величин V_c .

Такое изменение V_c приводит к радикальному изменению пульсаций давления плазмы в канале разряда (P_{ch}) (после завершения разряда – в парогазовой полости). Увеличение V_{cb} и соответственно V_c приводит к возрастанию отличия максимумов и минимумов P_{ch} (рис. 10). Второй максимум P_{ch} при $V_{cb} = 10,857$ л становится сравним с первым максимумом P_{ch} , а минимумы P_{ch} на порядок меньше, чем минимумы P_{ch} при $V_{cb} = 0,17$ л. Подобные изменения происходят и с температурой плазмы в канале разряда (T_{ch}) (после завершения разряда в парогазовой полости) (рис. 11).

Среднее давление в воде (P_{cb}), заполняющей разрядную камеру, уменьшается приблизительно в 2,5 раза с увеличением V_{cb} в 10 раз (рис. 12). В отличие от характеристик канала разряда

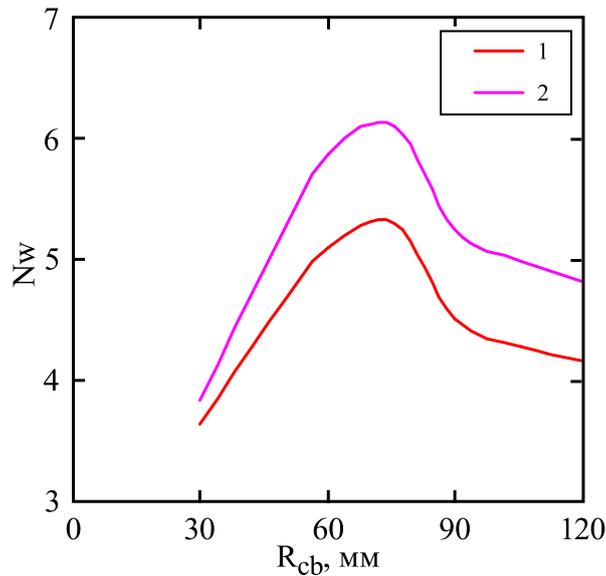


Рис. 13. Количество пробегов волн между цилиндрической стенкой разрядной камеры и электродами (1) и максимальным радиусом канала разряда (2) за первый период пульсации канала разряда.

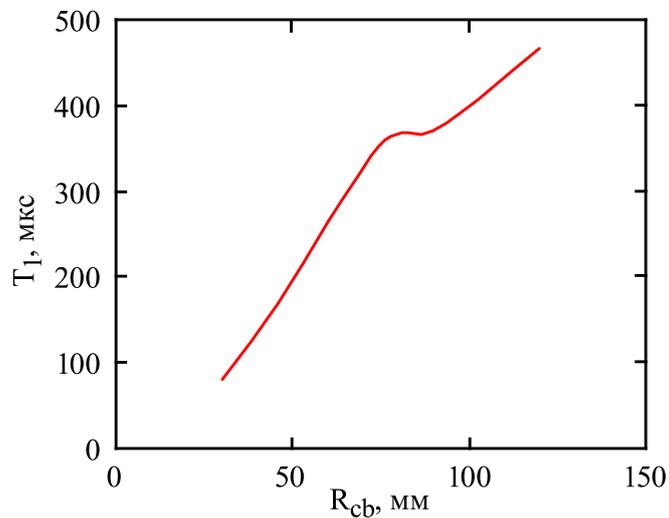


Рис. 14. Зависимость первого периода пульсации канала разряда и парогазовой полости от радиуса разрядной камеры.

(рис. 9–11) изменение (P_{cb}) запаздывает на 1/2 периода пульсаций канала разряда (после завершения разряда – парогазовой полости). Это обстоятельство подтверждает инерционную (волновую) природу этого явления (минимум P_{ch} соответствует по времени максимуму P_{cb}). Соотношение амплитуд колебаний величин P_{ch} и P_{cb} зависит от R_{cb} . В камере малого объема, когда $R_{cb} = 30$ мм, амплитуда колебаний P_{cb} больше, чем P_{ch} , как минимум в 2,5 раза и колебания P_{ch} затухают быстрее, чем P_{cb} (рис. 10 и 12). Когда $R_{cb} = 60$ мм, амплитуды колебаний P_{cb} и P_{ch} сравнимы по величине, но колебания P_{ch} затухают быстрее, чем P_{cb} (рис. 10 и 12). Увеличение R_{cb} до 120 мм приводит к большим амплитудам пульсации P_{ch} , которые на порядок превышают амплитуды колебаний P_{cb} (рис. 10 и 12), но большую часть времени величина P_{ch} остается на порядок меньшей, чем P_{cb} . Амплитуды первых трех максимумов P_{cb}

остаются на одном уровне при увеличении R_{cb} до 120 мм, а затем уменьшаются в отличие от меньших R_{cb} , когда максимумы P_{cb} уменьшаются монотонно (рис. 12). Эта особенность изменения максимумов P_{cb} при увеличении R_{cb} связана с возрастанием скорости расширения парогазовой полости в процессе ее пульсаций и соответственно увеличением давления ударных и гидродинамических волн.

Период пульсации канала разряда и парогазовой полости зависит от количества пробегов волн между цилиндрической стенкой разрядной камеры и поверхностью канала разряда, а впоследствии – парогазовой полостью (рис. 13). Учитывая быстрое уменьшение давления на фронте ударной волны (рис. 7 и 8), можно считать, что волны давления в разрядной камере распространяются со скоростью, близкой к скорости звука в невозмущенной воде. Количество пробегов волн (N_w) за первый период

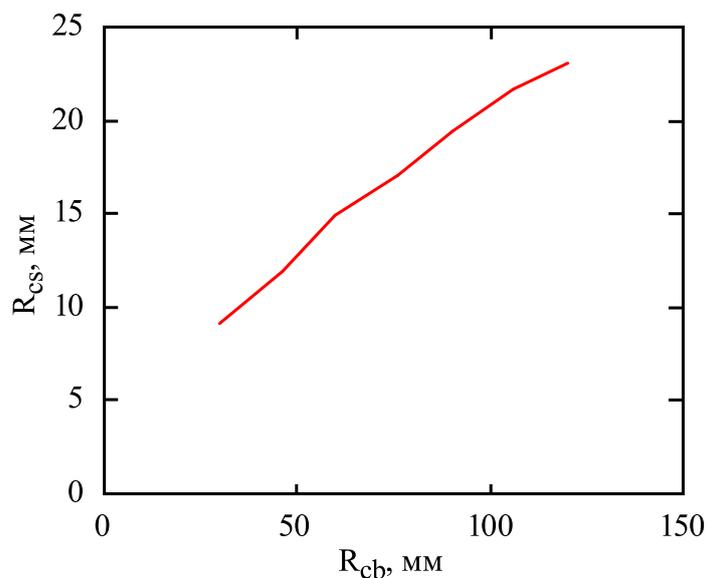


Рис. 15. Зависимость максимального радиуса канала разряда (среднего интегрального по длине канала) от радиуса разрядной камеры

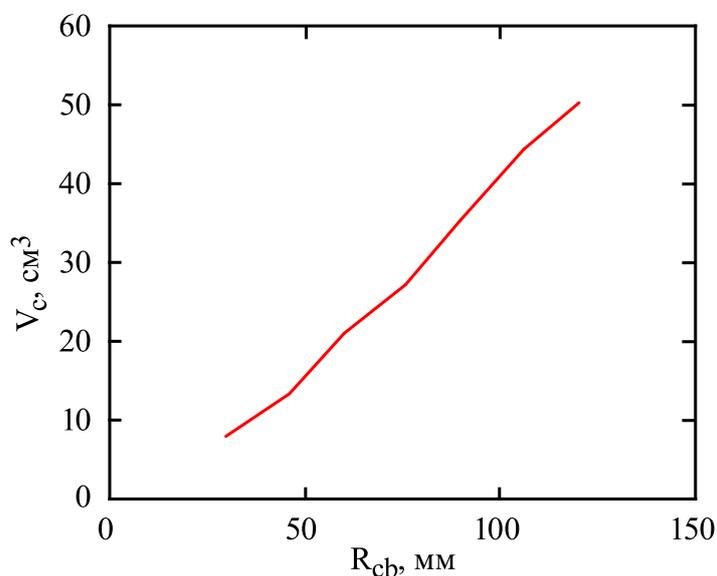


Рис. 16. Зависимость максимального объема канала разряда от радиуса разрядной камеры.

пульсации канала разряда и парогазовой полости зависит от R_{cb} и изменяется в пределах от 3,7 до 5,4 пробега, если считать, что длина пути пробега волн определяется расстоянием от цилиндрической стенки камеры до поверхности электродов (рис. 13, линия 1) и в пределах от 3,9 до 6,2 пробега, если длина пути равна расстоянию от стенки камеры до поверхности канала разряда в момент его наибольшего объема (рис. 13, линия 2). Более точное количество N_w определить сложно, так как радиус поверхности канала разряда изменяется вдоль его длины и переменный во времени. Поэтому более точная величина N_w находится в интервале между линиями 1 и 2, показанными на рис. 13. Величина N_w зависит от R_{cb} , и в рассмотренном интервале его изменения имеет максимум при $R_{cb} \approx 80$ мм (рис. 13). Период пульсации канала разряда и парогазовой полости (T_1) зависит от R_{cb}

и на интервалах до максимума N_w и после него увеличивается приблизительно линейно (рис. 14). Существенное влияние замкнутого объема разрядной камеры на T_1 можно определить в результате его сравнения с периодом пульсации пузыря сферической формы в неограниченном объеме несжимаемой жидкости без учета плавучести пузыря, вычисляемого по формуле Виллиса [20], который больше, чем T_1 , как минимум на 2 порядка.

Максимальная величина среднего интегрального радиуса канала разряда (R_{cs}) по его длине возрастает с увеличением R_{cb} (рис. 15). Изменение R_{cs} можно аппроксимировать зависимость:

$$R_{cs} = 0,8967 \times R_{cb}^{0,6813}. \quad (3)$$

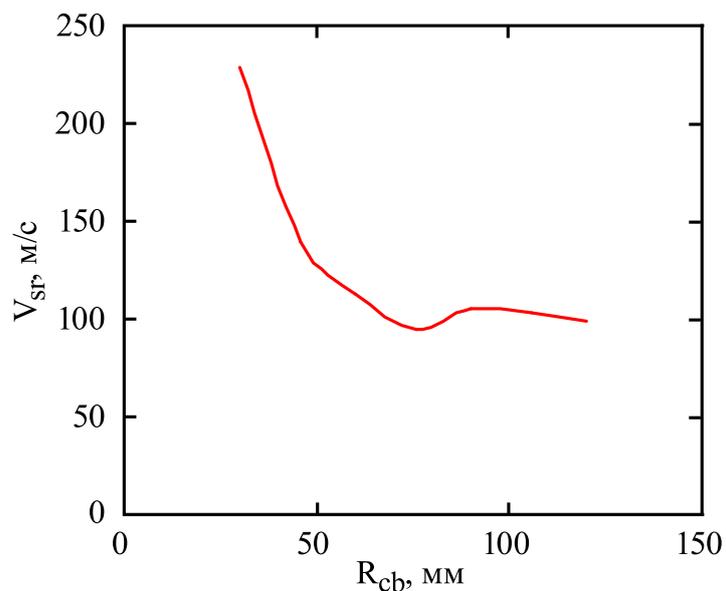


Рис. 17. Зависимость радиальной скорости канала разряда (средней по длине канала и средней за половину периода его пульсации) от радиуса разрядной камеры.

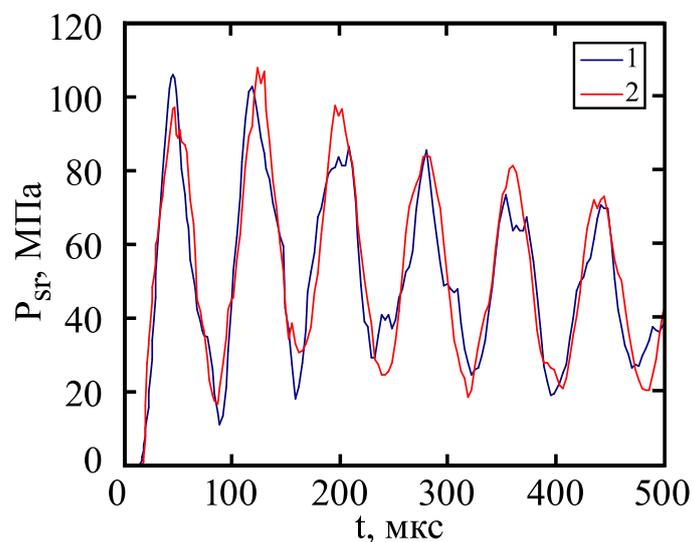


Рис. 18. Давление воды (среднее по поверхности) на: 1 – плоское дно разрядной камеры и 2 – цилиндрическую стенку ($R_{cb} = 30$ мм).

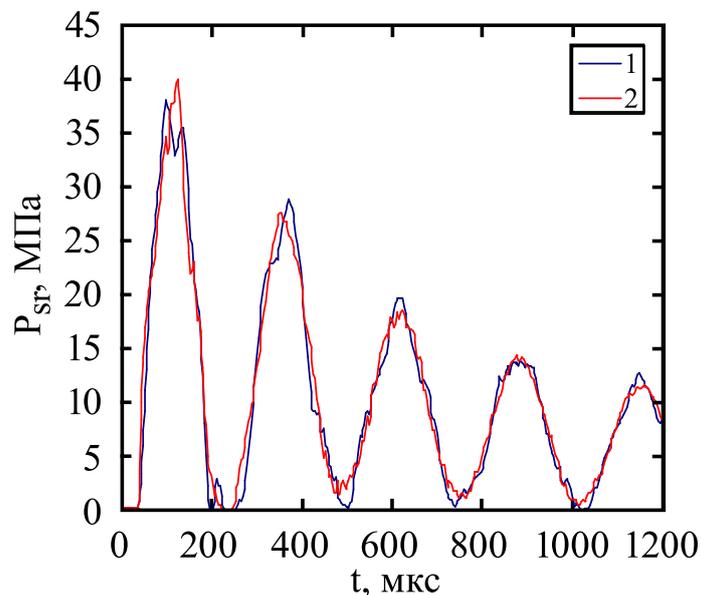


Рис. 19. Давление воды (среднее по поверхности) на: 1 – плоское дно разрядной камеры и 2 – цилиндрическую стенку ($R_{cb} = 60$ мм).

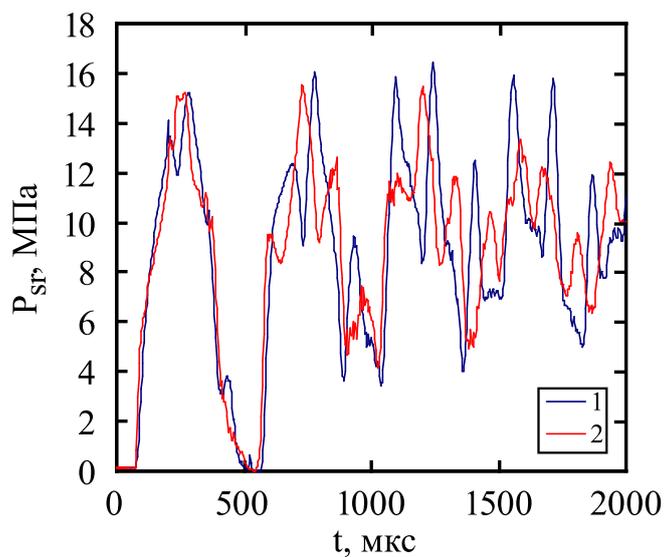


Рис. 20. Давление воды (среднее по поверхности) на: 1 – плоское дно разрядной камеры и 2 – цилиндрическую стенку ($R_{cb} = 120$ мм).

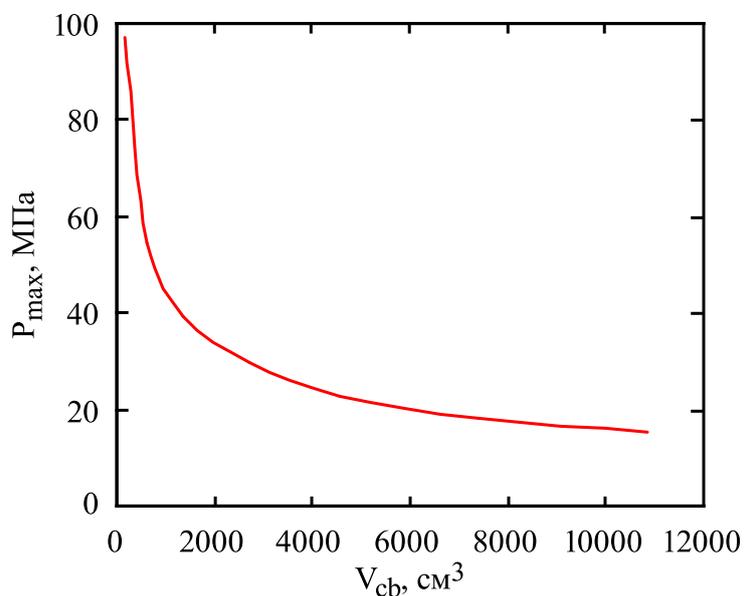


Рис. 21. Зависимость первого максимума давления воды (среднего по поверхности) на плоское дно разрядной камеры от ее объема.

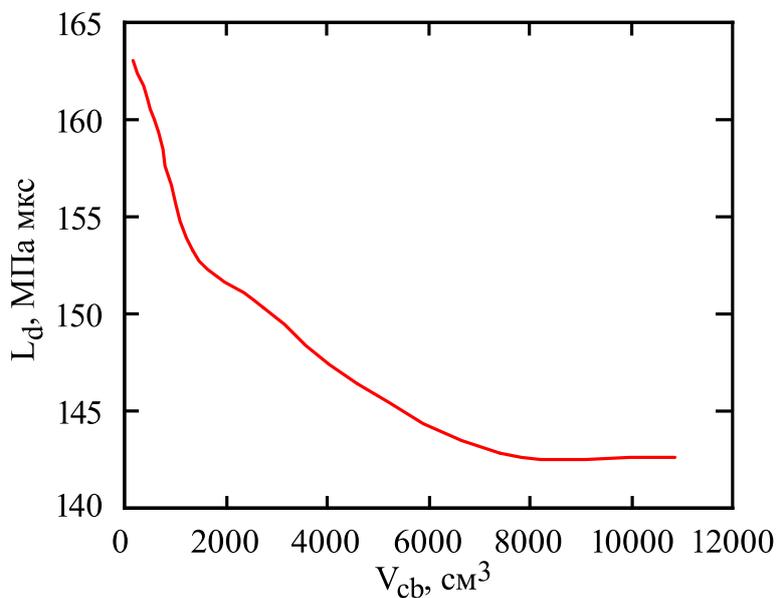


Рис. 22. Зависимость удельного импульса давления воды в конце первого периода изменения давления (среднего по поверхности дна) на плоское дно разрядной камеры от ее объема.

Величина V_c возрастает при увеличении R_{cb} (рис. 16) и может быть аппроксимирована функцией:

$$V_c = 0,0758 \times R_{cb}^{1,3625}. \quad (4)$$

Зависимость средней по длине канала и средней за половину первого периода его пульсации радиальной скорости канала разряда (V_{sr}) от R_{cb} (рис. 17) имеет следующую особенность. Если $R_{cb} < 60$ мм, тогда V_{sr} уменьшается от 230 м/с до уровня, близкого к 100 м/с, а при $R_{cb} > 60$ мм изменяется от 95 до 106 м/с. Это можно объяснить стабилизацией характеристик разряда, когда $R_{cb} > 60$ мм (рис. 2–4), и увеличением периода пульсации парогововой полости с увеличением R_{cb} (рис. 14).

Как среднее давление в воде P_{cb} (рис. 12), заполняющей разрядную камеру, так с тем же периодом изменяется и среднее давление воды (P_{sr}) (среднее по поверхности) на плоское дно разрядной камеры и на цилиндрическую стенку (рис. 18–20). Амплитуды P_{sr} больше, чем у P_{cb} , на величину от 10 до 20% вследствие увеличения амплитуды волн в процессе взаимодействия со стенками. Давление P_{sr} на поверхность дна камеры относительно мало отличается от давления P_{sr} на ее цилиндрическую поверхность (рис. 18–20), когда $R_{cb} \leq 60$ мм и в первый период изменения P_{sr} при $R_{cb} = 120$ мм. В последующие периоды изменения P_{sr} при $R_{cb} = 120$ мм давление на дно и цилиндрическую стенку разрядной камеры отличаются существенно (рис. 20). Минимумы и максимумы P_{sr} имеют большое отличие, которое возрастает с увеличением объема камеры. Когда $R_{cb} \geq 60$ мм, давление P_{sr} в конце первого периода понижается настолько, что в течение нескольких десятков микросекунд в воде возникает кавитация (рис. 19, 20). Из рис. 18–20 также следует, что после первого периода колебания давления P_{sr} его изменение существенно зависит от объема разрядной камеры. Зависимость первого максимума (P_{max}) давления P_{sr} на плоское дно разрядной камеры от ее объема (рис. 21) с высокой достоверностью аппроксимирована функцией:

$$P_{max} = 939,34 \times V_{cb}^{-0,4416}. \quad (5)$$

Увеличение V_{cb} , в рассмотренных пределах его изменения, приводит к уменьшению удельного импульса давления на дно камеры (L_d) не более чем на 14% (рис. 22) к концу первого периода колебания P_{sr} . Такое малое уменьшение L_d объясняется компенсацией уменьшения P_{sr} за счет увеличения T_1 . Аналогичным образом изменяется и удельный импульс давления на

цилиндрическую стенку камеры (L_s). Полный импульс давления на дно разрядной камеры изменяется практически пропорционально квадрату R_{cb} , а на цилиндрическую стенку – пропорционально R_{cb} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования определено, что поле давления в воде, заполняющей разрядную камеру с жесткими стенками, существенно зависит от ее объема. Взаимодействие волн, отраженных от стенок разрядной камеры, с поверхностью канала разряда в воде и парогововой полости имеет определяющее влияние на поле давления, а также определяет период и амплитуду пульсации канала разряда и парогововой полости, оказывая тем самым влияние на электрические характеристики разряда. Влияние на поле давления усиливается при уменьшении объема камеры. Период пульсации канала и парогововой полости лежит в интервале времени от 4 до 6 пробегов волн между их поверхностями и стенками разрядной камеры. С таким же периодом изменяется поле давления в воде, отставая от пульсации канала и полости на 1/2 периода. Увеличение объема разрядной камеры приводит к уменьшению амплитуды колебаний среднего давления в воде по степенной зависимости с показателем степени, близким к –0,5.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барбашова, Г.А., Вовченко, А.И., Влияние геометрии замкнутого цилиндра на гидродинамические процессы, происходящие в нем при высоковольтном электрохимическом взрыве, *ЭОМ*, 2016, т. 52, № 2, с. 51.
2. Golovashchenko, S.F., Gillard, A.J. and Mamutov, A.V., Formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *J. Mater. Process. Technol.*, 2013, vol. 213, p. 1191.
3. Melander, A., Delic, A., Björkblad, A., Juntunen, P., et al. Modelling of electro hydraulic free and die forming of sheet steels, *Int. J. Mater. Form.*, 2013, vol. 6, p. 223.
4. Hassenjadasl A., Green D.E., Golovashchenko S.F., Samei J., et al., Numerical modeling of electrohydraulic free-forming and die-forming of DP590 steel, *J. Manuf. Process.*, 2014, vol. 16, p. 391.
5. Mamutov, V., Golovashchenko, S. and Mamutov, A., Simulation of high-voltage discharge channel in water at electro-hydraulic forming using LS-DYNA, *Proc.*

- 13th Int. LS-DYNA Conference, June 8–14, 2014, Detroit, USA, 2014, p. 1.
6. Rohatgi, A.E., Stephens, V., Davies, R.W., Smith, M.T., et al., Electro-hydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming, *J. Mater. Process. Technol.*, 2012, vol. 212, p. 1070.
 7. Чачин, В.Н., Шадуя, В.Л., Журавский, А.Ю., *Электрогидроимпульсное формообразование с использованием замкнутых камер*, Минск: Наука и техника, 1985. 200 с.
 8. Смирнов, А.П., Жекул, В.Г., Мельхер, Ю.И., Тафтай, Э.И. и др., Экспериментальное исследование волн давления, генерированных электрическим взрывом в закрытом объеме жидкости, *ЭОМ*, 2017, т. 53, № 4, с. 47. doi: 10.5281/zenodo.1053757
 9. Дубовенко, К.В., Учет взаимодействия плазмы канала подводного электрического разряда с ударной волной, отраженной от стенки камеры, *ЭОМ*, 2013, т. 49, № 1, с. 30.
 10. Шнейерсон, Г.А., Оценка давления при медленных режимах искрового разряда в цилиндрической камере, заполненной водой, *ЖТФ*, 2003, т. 73, № 3, с. 100.
 11. Косенков, В.М., Математическое моделирование изменения удельной электропроводности плазмы и сопротивления канала нецилиндрической формы в процессе электрического разряда в воде, *ЭОМ*, 2019, № 2, с. 35. doi: 10.5281/zenodo.2629544
 12. Косенков, В. М., Влияние парогазовой полости на поле давления в замкнутой разрядной камере с жесткими стенками, *ЭОМ*, 2020, № 3–4, с. 42. doi.org/10.5281/zenodo.3970429
 13. Косенков, В.М., Преобразование энергии в колебательном контуре и цилиндрической разрядной камере в процессе электрического разряда в воде, *ЭОМ*, 2017, № 1, с. 90. doi.org/10.5281/zenodo.1049052
 14. Гулый, Г.А., Научные основы разрядно-импульсных технологий, Киев: Наукова думка, 1990. 311 с.
 15. Курец, В.И., Соловьев, М.А., Жучков, А.И., Барская, А.В., *Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов*, Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 272 с.
 16. Косенков, В.М., Бычков, В.М., Математическое моделирование переходных процессов в разрядном контуре и разрядной камере электрогидравлической установки, *ЭОМ*, 2015, т. 51, № 2, с. 66.
 17. Кривицкий, Е.В., *Динамика электровзрыва в жидкости*, Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
 18. Косенков, В.М., Бычков, В.М., Влияние индуктивности электрической цепи на энергетические характеристики разряда в воде и деформирования пластин, *Письма в ЖТФ*, 2017, т. 43, № 16, с. 102. doi: 10.21883/PJTF.2017.16.44939.16706
 19. Наугольных, К.А., Рой, Н.А., *Электрические разряды в воде*, М.: Наука, 1971. 155 с.
 20. Коул, Р., *Подводные взрывы*, М.: Издательство иностранной литературы, 1950, 494 с.

Summary

The volume of the discharge chamber has a great influence on the pressure field in the water filling it and on the efficiency of many technological processes; therefore, the study of the relationship between the volume of the chamber and the pressure in it is an urgent task. However, at present, the role of the volume of the discharge chamber in the formation of the pressure field in it has been insufficiently studied. The purpose of this work is to fill the gap. The study was carried out on the base of a previously developed mathematical model of an electric discharge in water, the adequacy of which was substantiated via a comparison of the simulation results with experimental data. It is determined that the closed volume of the discharge chamber with rigid walls significantly affects the formation of the pressure field in the water filling it. In this case, the interaction of waves reflected from the walls of the discharge chamber with the surface of the discharge channel in water and the vapor-gas cavity is of decisive importance. The reflected waves determine the period and amplitude of the pulsation of the discharge channel and the vapor-gas cavity, thereby influencing the electrical characteristics of the discharge. This influence increases with decreasing the chamber volume.

Keywords: electric discharge in water, mathematical modeling, discharge channel, vapor-gas cavity, pressure field, discharge chamber