

03

Обеззараживающее действие мощного импульсного электрического разряда в воде. I. Зарождение, эволюция и структура ударных волн

© К.В. Вилков, Ю.А. Нагель

Федеральное государственное унитарное предприятие
„Исследовательский Центр им. М.В. Келдыша“ Москва
E-mail: kerc@elnet.msk.ru

Поступило в Редакцию 18 марта 2003 г.

В окончательной редакции 11 сентября 2003 г.

Теоретически исследованы зарождение, эволюция и структура ударных волн, являющихся основным фактором бактериального обеззараживания при мощных импульсных электрических разрядах в воде. Исследование структуры ударной волны проведено в плоском одномерном приближении с использованием обобщенных уравнений гидродинамики, предложенных Б.В. Алексеевым. Рассмотрены возможные механизмы деструкции микроорганизмов при воздействии ударной волны.

Введение. Идея применения импульсного электрического разряда для обеззараживания воды принадлежит Л.А. Юткину [1]. Достигнутые в 60–70 гг. экспериментальные значения удельной энергоемкости обеззараживания импульсным разрядом оказались достаточно высокими ($\sim 1\text{--}10 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ в зависимости от концентрации микроорганизмов), что не позволило приступить к практическим работам [2]. Прогресс в области импульсной энергетики, потребность в безреагентных методах обеззараживания воды возродили интерес к идее Л.А. Юткина. Результаты исследования энергетической эффективности импульсно-периодических разрядов с энергией в импульсе $\sim 1\text{--}20 \text{ J}$ приведены в [3–6]. Отличительная особенность таких разрядов — локальное многофакторное воздействие на микроорганизмы в области, непосредственно прилегающей к зоне разряда, удельная

Таблица 1.

	Импульсный разряд	Электрический взрыв проводника	Взрыв конденсированного вещества	Воздействие импульсного лазерного излучения	Удар пластины
$a, \text{m/s}^2$	$1.6 \cdot 10^8$	10^9	$3 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^{10}$	$2.2 \cdot 10^{11}$
$t_z, \mu\text{s}$	2.3	0.4	0.1	$3.2 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$
x_z, mm	3.5	0.6	0.2	$4.7 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$

энергоёмкость $\sim 0.5 \div 1.0 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$. В случае применения мощных импульсных разрядов (энергия в импульсе несколько кДж) основным фактором воздействия на микроорганизмы становится ударная волна, и деструкция микроорганизмов возможна при однократном воздействии разряда в отличие от импульсно-периодических разрядов малой мощности, когда эффект обеззараживания достигается путем „накопления повреждений“ у микроорганизмов. При использовании мощных разрядов существенно возрастают термомеханические нагрузки на элементы конструкции, однако появляется возможность снижения удельной энергоёмкости за счет сокращения потребного числа разрядов до одного и увеличения объема обеззараживаемой воды.

Зарождение, эволюция и структура ударных волн. Исследование проводилось в плоской одномерной постановке при допущении мгновенного энерговыделения в сечении $x = 0$ полупространства $x \geq 0$. При определении координаты и времени зарождения ударных волн использовались соотношения [7]:

$$t_z = \frac{2c}{(\gamma + 1)a}, \quad x_z = \frac{2c^2}{(\gamma + 1)a}, \quad (1)$$

где c — скорость звука, γ — показатель степени в уравнении состояния, a — ускорение при $x = 0, t = 0$. Рассчитанные по формулам (1) данные для импульсного разряда и альтернативных источников инициирования ударных волн в воде для характерных значений a [7–9] даны в табл. 1 (плотность энерговыделения 2.95 kJ/cm^2).

Таблица 2.

Δp , МПа	δ , nm	Δp , МПа	δ , nm
50	~ 75	1190	4.54
80	64.4	1670	4.16
100	53.1	2285	3.92
155	37.3	3055	3.74
295	8.46	4015	3.64
515	6.22	5200	3.57

Таблица 3.

	Импульсный разряд	Электрический взрыв проводника	Взрыв конденсированного вещества	Воздействие импульсного лазерного излучения	Удар пластины
c^2/a , mm	13.9	2.2	0.75	$1.9 \cdot 10^{-1}$	10^{-2}
c/a , μ s	9.3	1.5	0.5	$1.3 \cdot 10^{-1}$	$6.9 \cdot 10^{-3}$

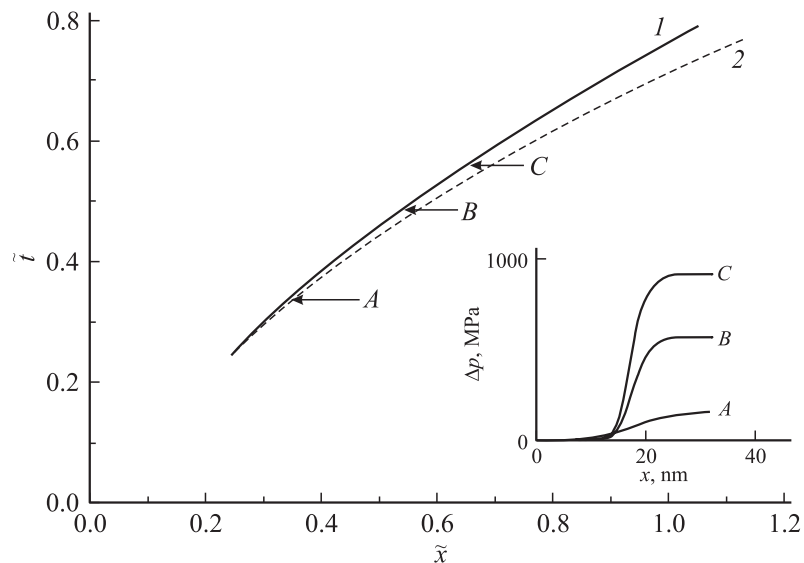
Расчет структуры фронта ударной волны проводился на основе обобщенных уравнений гидродинамики (уравнений сохранения массы и импульса [10]) и уравнения состояния воды в форме Тейта:

$$\frac{d\rho v}{dx} - \frac{d}{dx} \tau \frac{d}{dx} [p + \rho v^2] = 0,$$

$$\frac{d(p + \rho v^2)}{dx} - \frac{d}{dx} \tau \frac{d}{dx} [3vp + \rho v^3] = 0, \quad p = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (2)$$

где $B = 3.045 \cdot 10^8$ Pa, $\gamma = 7.15$, ρ_1 — плотность воды при нормальных условиях. Величина $\tau = r_0/c$, $r_0 = 3.5 \cdot 10^{-10}$ m — среднее расстояние между молекулами.

Граничными условиями для системы (2) являются заданные значения плотности и скорости перед фронтом и за фронтом, связанные между собой соотношениями на разрыве. В табл. 2 даны рассчитанные значения толщины фронта ($\delta = (\rho_2 - \rho_1)/(d\rho/dx)_{\max}$) в зависимости от перепада давлений Δp в ударной волне.



Зарождение и эволюция ударных волн в воде: 1 — траектория ударной волны, 2 — огибающая характеристик.

Эволюция ударной волны в предположении $a = \text{const}$ представлена в координатах $\tilde{x} = x/(c^2/a)$, $\tilde{t} = t/(c/a)$ на рисунке. Зарождению ударной волны соответствуют координаты $\tilde{x} = \tilde{t} = 0.24$. Размерные множители для различных способов инициирования ударных волн приведены в табл. 3. При импульсных разрядах с плотностью энерговыделения 2.95, 17.7, 35.4 кДж/см² максимальный перепад давления в волне (профили A, B, C на рисунке) достигается в точках $x_A = 3.4$ мм, $t_A = 3.2$ мкс; $x_B = 70$ мм, $t_B = 4.3$ мкс; $x_C = 9.5$ мм, $t_C = 5.5$ мкс. То есть, несмотря на меньшее значение a по сравнению с другими источниками инициирования (табл. 1), импульсный разряд обеспечивает приемлемые для практики пространственно-временные масштабы зарождения и формирования ударных волн.

О механизме деструкции микроорганизмов от воздействия ударной волны. Одной из причин гибели микроорганизмов может быть повреждение клетки, ее структур вследствие термического или механического эффектов. Поскольку при $\Delta p \geq 50$ МПа (табл. 2) толщина

Таблица 4.

	$k_m, 1/\text{Pa}$	$\beta, 1/\text{K}$	$c_V, \text{kJ/kgK}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	B, Pa	$1/\gamma$
1	$(3.5 \div 4.5) \cdot 10^{-10}$	$0.182 \cdot 10^{-3}$	4.18	10^3	$3.045 \cdot 10^8$	0.14
2	$(0.5 \div 1.0) \cdot 10^{-9}$	$\sim 10^{-3}$	$1.0 \div 3.0$	$7.5 \cdot 10^2$	$(0.7 \div 0.9) \cdot 10^8$	0.08–0.1

фронта существенно меньше характерного размера микроорганизма ($\sim 1 \div 10 \mu\text{m}$), при оценке указанных эффектов применим гидродинамический подход. Нагрев микроорганизмов в результате прохождения ударной волны можно оценить по формуле [11]

$$T/T_0 = (V/V_0)^{-\Gamma_0}, \quad (3)$$

где изменение удельного объема V/V_0 определяется из уравнения Тейта, коэффициент Грюнайзена $\Gamma_0 = \beta/\rho k_m c_V$. Необходимые для расчета исходные данные приведены в табл. 4. Используются обозначения: 1 — вода, 2 — органические жидкости, входящие в состав микроорганизмов, k_m — изотермический коэффициент сжимаемости, β — объемный коэффициент температурного расширения, c_V — удельная теплоемкость.

Согласно оценкам по формуле (3), нагрев микроорганизмов до температуры свыше 100°C возможен при перепаде давления во фронте ударной волны $\Delta p > 1.7 \cdot 10^3 \text{ MPa}$, причем температура воды при этом повысится на $\Delta T \cong 10 \text{ K}$. При оценке механического эффекта будем считать микроорганизмы сферами диаметром d и воспользуемся условием дробления сферических капель жидкости плотностью ρ_0 вследствие развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца при обтекании жидкостью плотности ρ [12]

$$\Delta p > \rho^{1/2} D \left(\frac{2\pi\sigma}{d} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где D — скорость ударной волны, σ — сила поверхностного натяжения на границе раздела.

Толщина клеточной стенки микроорганизма, имеющей полимерную структуру, $\Delta = 10\text{--}25 \text{ nm}$. Поскольку напряжение разрыва для жидкости σ_p связано с поверхностным натяжением приближенным

соотношением $\sigma_p \cong 2\sigma/r_0$ [13], то формулу (4) можно применить в рассматриваемом случае, если формально заменить величину σ на $\sigma_* = \sigma_1 \Delta/r_0$ или $\sigma_* = \sigma_p \Delta$, где σ_1 и σ_p — поверхностное натяжение и прочность на разрыв материала клеточной стенки. Типичные значения σ_p для полимеров ~ 20 МПа [4], и, согласно (4), получаем $\Delta p > (0.6 - 1.35) \cdot 10^2$ МПа.

Заключение. При мощном импульсном разряде в воде ударная волна зарождается и формируется в непосредственной близости от оси разряда: на расстоянии $\sim 3-5$ мм от нее (плотность энергосвечения ~ 3 кДж/см²). При перепаде давления > 50 МПа толщина фронта много меньше характерного размера микроорганизмов, что позволяет рассматривать последние как макрообъекты. Из рассмотренных механизмов деструкции микроорганизмов ударной волной наиболее вероятный — дробление вследствие развития неустойчивости при обтекании. Потребный перепад давления оценивается величиной более $(0.6-1.35) \cdot 10^2$ МПа. Эта величина может служить ориентиром при практической реализации условий деструкции микроорганизмов при однократном воздействии разряда.

Список литературы

- [1] Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.-Л., 1955. 51 с.
- [2] Сытин И.А. Электрогидравлическое действие на микроорганизмы. Киев: Здоровье, 1982. 75 с.
- [3] Горячев В.Л., Рутберг Ф.Г., Федюкович В.Н. // ТВТ. 1996. Т. 34. № 5. С. 757–760.
- [4] Горячев В.Л., Рутберг Ф.Г., Федюкович В.Н. // Изв. РАН. Энергетика. 1998. Т. 34. № 1. С. 40–55.
- [5] Авчинников А.В., Недачин А.Е., Рахманин Ю.А. и др. // Медицинская консультация. 1996. № 1 (9). С. 9–11.
- [6] Авчинников А.В. // Вест. Смоленской мед. академии. 2001. № 3. С. 75–80.
- [7] Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 228 с.
- [8] Царенко П.И., Ризун А.Р., Жирнов М.В. и др. Гидродинамические и теплофизические характеристики мощных подводных искровых разрядов. Киев: Наук. думка, 1984. 147 с.
- [9] Янушкевич В.А. // ФХОМ. 1975. № 5. С. 9–11.
- [10] Алексеев Б.В., Грушин И.Т. Процессы переноса в реагирующих газах и плазме. М.: Энергоатомиздат, 1994. 432 с.

- [11] *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
- [12] *Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Нигматулин Р.И.* и др. // ДАН СССР. 1977. Т. 233. № 2. С. 292–294.
- [13] *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 592 с.
- [14] *Физические величины: Справочник* / Под ред. Григорьева Н.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.