

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 | $1.3 \cdot 10^{-1}$ | $6.9 \cdot 10^{-3}$ |

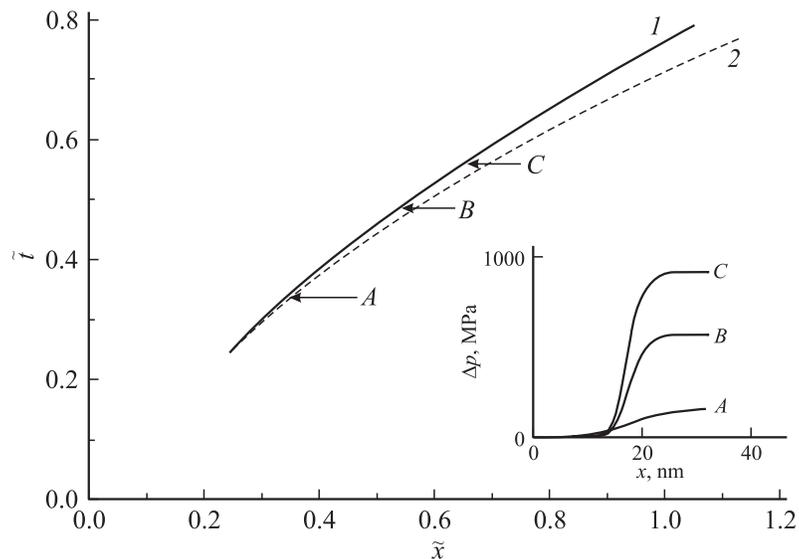
Расчет структуры фронта ударной волны проводился на основе обобщенных уравнений гидродинамики (уравнений сохранения массы и импульса [10]) и уравнения состояния воды в форме Тейта:

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

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

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 энергоснабжения ~ 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.