

03;12

Гидродинамический способ модификации микробиообъектов

© Г.А. Баранов, А.А. Беляев, С.Б. Оникиенко,
С.А. Смирнов, В.В. Хухарев

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова, С.-Петербург
E-mail: laser@mail.rcom.ru
Российская Военно-медицинская академия, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 26 мая 2004 г.

Выполнено экспериментальное изучение и численное моделирование гидродинамических процессов, вызывающих трансформацию микробиообъектов.

В [1,2] представлены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований гидро- и газодинамических процессов, имеющих место при воздействии на воду лучом CO₂-лазера с целью разрушения растворенных в ней молекул полисахаридов с образованием молекулярных фракций, высокоэффективных в иммунологии инфекционных и онкологических заболеваний [3]. В этих работах было показано существование как нижнего предела мощности лазерного луча, с которого начинается деполимеризация крупных молекул амилопектина, так и верхнего предела мощности, за которым она прекращается. В качестве параметра, связывающего макро- и микрогидродинамические характеристики, была принята скорость деформации жидкости $\varepsilon = ((\partial u/\partial x)^2 + (\partial v/\partial y)^2 + (\partial w/\partial z)^2)^{0.5}$, при определенном уровне которой (1) крупные молекулы могут менять форму [4]:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{kT}{\mu \langle h^2 \rangle^{3/2}}, \quad (1)$$

здесь $\langle h^2 \rangle^{1/2}$ — среднеквадратичное расстояние между двумя свободными концами молекулы; k — постоянная Больцмана; T — температура; μ — коэффициент динамической вязкости. Для молекул амилопектина $\langle h^2 \rangle^{1/2} \approx 0.214 \mu\text{m}$ и, согласно (1), критическая скорость деформации воды порядка $\varepsilon_{cr} = 500 \text{ s}^{-1}$. В условиях [1,2] эта величина реализуется

Мощность излучения, kW/cm ²	Состав биоматериала, % mol.	
	Олигосахариды	Полисахариды
0	24.94	75.05
0.2	24.95	75.04
0.6	30.92	68.06
0.9	34.74	64.49

в волнах сжатия и разрежения жидкости, возникающих при поверхностном поглощении лазерного излучения.

При разработке технологического процесса лазерного облучения полисахаридов определены области мощности излучения, при которой выход целевого продукта (олигосахаридов) наибольший. Таблица, приведенная ниже, демонстрирует изменение молекулярного состава раствора исландского мха в сторону замещения полисахаридов (с массами от 80 000 до 400 000 у.а.) более низкомолекулярными олигосахаридами (с массами от 20 000 до 60 000 у.а.). Отметим, что при плотности мощности более 1 kW/cm² наблюдается сгорание заметного количества органических веществ, что, как правило, не приемлемо. Для предотвращения обратной полимеризации модифицированного соединения в исходный продукт добавляется ингибитор полимеризации. Это приводит к значительному повышению эффективности использования как энергии излучения, так и исходного природного соединения. В качестве ингибитора полимеризации применялся этиловый спирт, хорошо сочетающийся с большинством лекарственных препаратов и являющийся для них консервантом. Экспериментально установлено, что при содержании 10% по объему этиловый спирт предотвращает полимеризацию олигосахаридов, полученных путем лазерной модификации полисахаридов из исландского мха.

Данная работа продолжает ранее начатые исследования изучением процессов трансформации молекул амилопектина в потоках воды с большими величинами скорости деформации, создаваемых коническим соплом. Рассмотрены кавитационные процессы, о разрушающей силе которых известно, например, по эрозии поверхности гребных винтов и, в частности, по уничтожению микрофлоры молока при его кавитационной обработке. Эти эффекты связаны с возникновением пузырьков в области разрежения жидкости и их последующим захлопыванием

в области сжатия, сопровождающимся развитием больших локальных давлений. Деформация и расщепление кавитационных пузырьков могут приводить также к появлению локальных нескомпенсированных зарядов, инициирующих звукохимические реакции [4,5]. В данной работе при изучении гидродинамических процессов применено макроскопическое моделирование двухфазной среды, модель кавитационного осесимметричного течения соответствует [6], структура среды в масштабах кавитационных пузырьков не рассматривается.

Эксперимент проведен с использованием сопел, имеющих начальные цилиндрические участки длиной 3 мм и диаметром от 0.5 до 2 мм, переходящие в конусы с полным углом расширения $\alpha = 60^\circ$. В экспериментальном стенде перед соплом размещалась емкость с водным раствором амилопектина, соединенная с азотным баллоном высокого давления трубопроводом со встроенными редуктором, вентиляем, манометром и клапаном. Прокатка водного раствора через сопло начиналась после срабатывания клапана и нагнетания азота в указанную емкость. Диапазон изменения избыточного давления азота $1 \div 10$ атм. После прокачки раствора через сопло проводился анализ молекулярных фракций.

Модель включает в себя нестационарные уравнения Навье–Стокса:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

уравнение переноса объемной доли жидкости

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_1 u_i) = (m^+ - m^-), \quad (3)$$

$$\rho_m = \rho_1 \alpha_1 + \rho_v (1 - \alpha_1), \quad (4)$$

где t — время; x — координата; u — компонента скорости; p — давление; ρ — эффективная плотность; ρ_1 — плотность жидкости; ρ_v — плотность пара; μ — динамическая вязкость (ламинарная); μ_t — турбулентная вязкость; α_1 — объемная доля жидкой фазы;

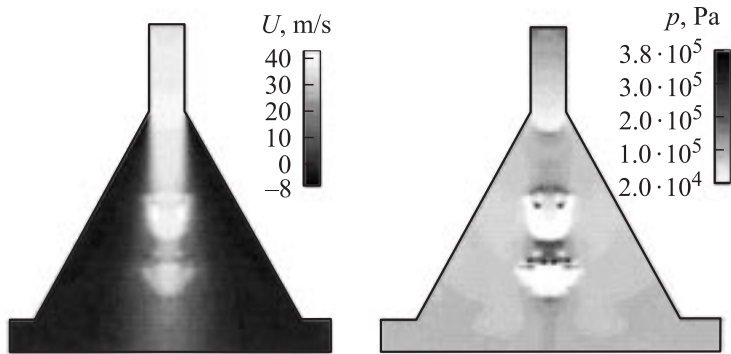


Рис. 1. Осевая скорость U и статическое давление p .

m^+ — скорость испарения; m^- — скорость конденсации [6]. В [6] для расчета турбулентной вязкости была использована неравновесная $k-\varepsilon$ -модель турбулентности, в данной работе была применена $k-\omega$ -модель [7], по нашему мнению, удовлетворительно адаптированная к описанию течений со свободными турбулентными зонами

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho_m k}{\omega},$$

$$\frac{\partial \rho_m k}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m u_i k}{\partial x_i} = P \rho_m - \rho_m \omega k + \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right], \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_m \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m u_i \omega}{\partial x_i} = C_{\omega_1} \frac{\rho_m P \omega}{k} - C_{\omega_2} \rho_m \omega^2 + \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right], \quad (6)$$

P — источник энергии турбулентности; k — кинетическая энергия турбулентности; ω — удельная скорость диссипации энергии турбулентности; $C_\mu = 0.09$, $C_{\omega_2} = 0.833$, $C_{\omega_1} = 0.555$, $\sigma_k = \sigma_\omega = 2.0$ — константы.

На рис. 1, 2 показаны расчетные мгновенные распределения осевой скорости потока, статического давления, объемной доли паровой фазы и десятичного логарифма в зависимости от скорости деформации среды. Нестационарные расчеты проведены для сопла диаметром 0.5 mm на

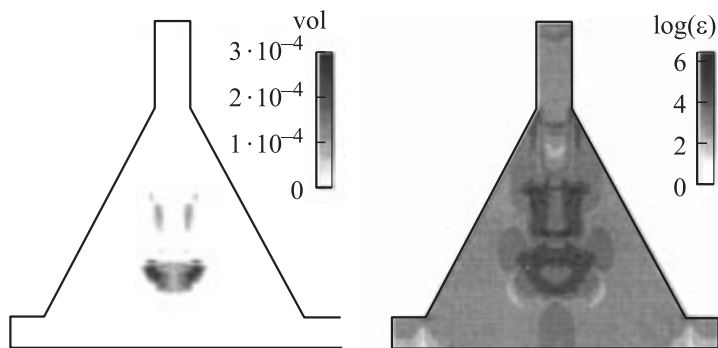


Рис. 2. Объемная доля паров vol и десятичный логарифм от скорости деформации $\log(\epsilon)$.

входе в цилиндрическую часть сопла задавалось избыточное полное давление $7 \cdot 10^5$ Pa, начальное давление в сопле равно 10^5 Pa. Видно, что в конусе сопла образуются две зоны с сильной неоднородностью газодинамических параметров. В них наблюдаются anomalно высокая локальная скорость жидкости и разрежение газа до $2 \cdot 10^4$ Pa (рис. 1). С распределением давления согласуется распределение паровой фазы (рис. 2). Расчет без учета кавитации приводит к появлению в этих зонах отрицательных давлений. В кавитационных областях достигаются максимальные скорости деформации (рис. 2), которые на три-четыре порядка больше величины, полученной в расчетах с лазерным воздействием на поверхность воды [1,2]. Следовательно, можно ожидать, что в рассмотренной здесь относительно простой конструкции кавитационное течение должно обеспечить высокую эффективность модификации микробиообъектов.

В созданной на основании расчетов экспериментальной установке было применено сопло, имеющее начальный цилиндрический участок диаметром 0.5 mm, переходящий в конус с полным углом расширения $\alpha = 60^\circ$. Выполненные на ней эксперименты подтвердили прогноз о модификации микробиообъектов, в частности было обнаружено существование диапазона оптимального избыточного давления перед соплом $4 \div 6$ atm, который обеспечивал увеличение биологической активности дрожжей в 1.5 раза по реакции торможения миграции лейкоцитов

с антигенами супернатанта дрожжевой культуры, а также по росту массы дрожжевой культуры и увеличению выхода метаболитов — углекислого газа и этилового спирта. Механизм трансформации аналогичен механизму трансформации полисахаридов, т.е. вызывается сильным механическим воздействием на клетки дрожжей. В отличие от процесса обработки полисахаридов, в этом случае происходит не разрушение структуры молекул, а нормальная реакция клеток на стресс, выражающаяся в активации их жизненных процессов.

Выводы.

1. Построена модель, описывающая нестационарное осесимметричное течение двухфазной кавитирующей жидкости в системе вода–пар–неконденсирующийся газ.

2. Выполнен расчет скоростей деформации воды в кавитационных областях, показавший наличие высоких скоростей деформации воды.

3. Экспериментально установлено наличие диапазона оптимальных давлений перед соплом, при которых происходит рост биологической активности дрожжей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 01–01–00325.

Список литературы

- [1] Баранов Г.А., Беляев А.А., Оникиенко С.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 8. В. 17. С. 25–30.
- [2] Баранов Г.А., Беляев А.А., Оникиенко С.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 13. С. 57–63.
- [3] Баранов Г.А., Оникиенко С.Б., Хухарев В.В. и др. // Тез. докл. 8-го международного конгресса Европейской Медицинской лазерной ассоциации и 1-го Российского конгресса Медицинской лазерной ассоциации. 23–26 мая 2001, Москва. С. 15–16.
- [4] Бэтчелор Дж.К. // Труды XIV междунар. конгресса IUTAM. М.: Мир, 1979. С. 136–187.
- [5] Маргулис М.А. // УФН. 2000. Т. 170. № 3. С. 263–287.
- [6] Senocak I., Shyy W. A Pressure-based method for turbulent cavitating flow computations. 31st AIAA Fluid Dynamics Conference & Exhibit, 11–14 Jule, 2001. Anaheim, CA. AIAA 2001–2907.
- [7] Wilcox D.C. Turbulence modelling for CFD. 2nd ed. DCW Industries, California, 1998.