

03;07

## **Взаимодействие луча CO<sub>2</sub>-лазера с падающей каплей жидкости при модификации растворенных в ней биообъектов**

© 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 им. С.М. Кирова, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 21 января 2003 г.

Выполнено численное моделирование нестационарных процессов взаимодействия излучения CO<sub>2</sub>-лазера со свободно падающей каплей воды. Рассчитывались газодинамика обтекания капли окружающим воздухом, тепловое поле в капле и двухфазные превращения на поверхности жидкости. Для тестирования модели и результатов расчетов проведены эксперименты. Работа выполнена с целью объяснения эффектов, связанных с деполимеризацией крупных молекул полисахаридов при облучении их водного раствора лазерным лучом.

В [1] описаны результаты расчетно-теоретического и экспериментального исследований процессов, вызывающих деполимеризацию молекул полисахаридов, при облучении их водного раствора лазерным лучом. Было показано, что при поверхностном поглощении лазерного излучения в воде возбуждаются волны, в которых скорость деформации среды [2] достаточна для деформации молекулы амилопектина [3]. Был определен наиболее вероятный гидродинамический эффект, вызывающий разрушение крупных молекул полисахаридов и образование молекулярных фракций, высокоэффективных в иммунологии инфекционных и онкологических заболеваний [4]. Данная работа является продолжением исследований, выполненных в [1]. Наряду с расчетами теплового поля в капле выполнены расчеты движения газовой смеси, окружающей каплю (воздух с парами воды, вышедшими с поверхности капли). Скорость испарения воды определялась по формуле

Герца–Кнудсена [5]. Численный анализ, проведенный наряду с экспериментами по определению скорости отброса капли от луча, позволил оценить величину коэффициента конденсации, от которой зависит как скорость испарения, так и тепловое поле в капле, а следовательно, и время начала взрывного кипения поверхностного слоя. На основе этих результатов высказано предположение о причине прекращения процесса деполимеризации молекул амилопектина при превышении мощностью лазерного луча некоторого порога.

**1. Модель.** Движение газовой смеси вокруг капли рассчитывалось с использованием нестационарной системы уравнений Навье–Стокса, массо- и теплопереноса:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho(\bar{\mathbf{V}}\nabla)\bar{\mathbf{V}} = \rho\mathbf{g} - \nabla p + \nabla\mu(\nabla\mathbf{V}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{V}) = 0, \quad (2)$$

$$c_p\rho \frac{\partial T}{\partial t} + c_p\rho\bar{\mathbf{V}}(\nabla T) = \nabla\lambda(\nabla T), \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \bar{\mathbf{V}}(\nabla c_i) = \nabla D_i(\nabla c_i), \quad (4)$$

$$p = \rho RT \sum_{i=1}^{N_k} \frac{c_i}{m_i}, \quad (5)$$

где  $T$ ,  $p$ ,  $\rho$  — температура, давление и плотность газа;  $\bar{\mathbf{V}}$  — вектор скорости;  $\mu$  — вязкость;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $N_i$  — число компонент газовой смеси;  $m_i$ ,  $c_i$  — молекулярный вес и массовая доля  $i$ -й компоненты газовой смеси;  $\lambda$  — теплопроводность;  $c_p$  — теплоемкость;  $D_i$  — коэффициент диффузии  $i$ -й компоненты.

Для расчетов коэффициентов вязкости, диффузии и теплопроводности использовались формулы Уилки и Масона–Саксены [6]. Для расчета массового потока паров воды на границе капли и газа использовалась формула Герца–Кнудсена

$$R_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\gamma m_{\text{H}_2\text{O}}(p_{\text{H}_2\text{O}}^s - p_{\text{H}_2\text{O}})}{\sqrt{2\pi m_{\text{H}_2\text{O}} RT}}, \quad (6)$$

где  $T$  — температура поверхности;  $p_{\text{H}_2\text{O}}^s$  — давление насыщения паров воды при температуре поверхности;  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  — парциальное давление

воды около поверхности;  $\gamma$  — коэффициент конденсации;  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  — молекулярный вес воды.

Расчеты распределения температуры в капле проводились вдоль нормали к поверхности с использованием уравнения, записанного в системе координат, движущейся со скоростью испарения ( $v_s$ ) [7]:

$$\rho^* c_p^* \frac{\partial T^*}{\partial t} - \rho^* c_p^* V_s \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \lambda \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} + \alpha I e^{-\alpha y^*}, \quad (7)$$

с граничным условием  $\lambda^* \partial T^* / \partial y^* = \rho^* h V_s$ , где  $t$  — время,  $y^*$  — координата, направленная по нормали к поверхности;  $\lambda^*$  — теплопроводность;  $c_p^*$  — теплоемкость;  $h$  — удельная теплота парообразования воды;  $\rho^*$  — плотность воды,  $T$  — плотность излучения. Скорость движения поверхности испарения рассчитывалась по формуле

$$V_s = \frac{R_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho^*}, \quad (8)$$

а скорость газа на поверхности капли по формуле

$$V_g = V_s \frac{\rho^*}{\rho}. \quad (9)$$

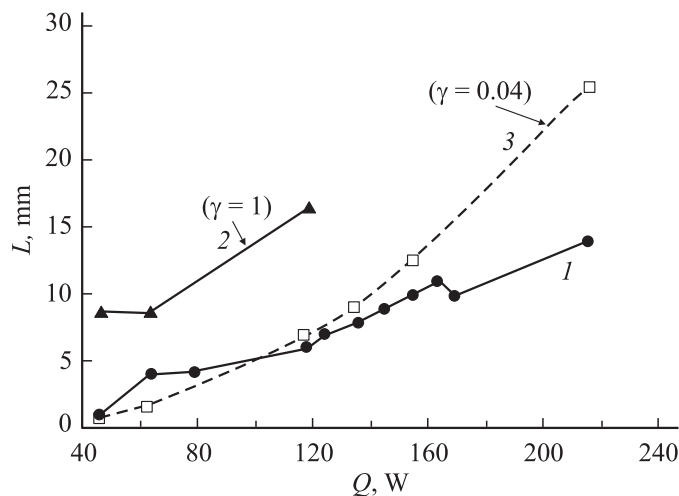
Реактивная сила, действующая на каплю в направлении луча ( $x$ ), определялась формулой

$$F_x = \int_s V_{gx}^2 \rho ds, \quad (10)$$

где  $V_{gx}$  — компонента скорости газа вдоль оси  $x$ .

**2. Результаты расчетов и экспериментов.** Эксперименты были выполнены на экспериментальной установке, описанной в [1]. Капля диаметром  $D = 2.6$  mm формировалась на высоте  $h = 12$  mm от места взаимодействия с лучом CO<sub>2</sub>-лазера и после взаимодействия пролетала  $H = 135$  mm до места, где измерялось ее горизонтальное смещение ( $L$ ), которое было вызвано реактивной силой при испарении воды. Диаметр луча в зоне взаимодействия был равен  $d = 1.6$  mm. Распределение плотности мощности по радиусу луча было гауссовым.

Для адекватного расчета температурного поля в капле и, следовательно, определения ряда других эффектов, например момента начала

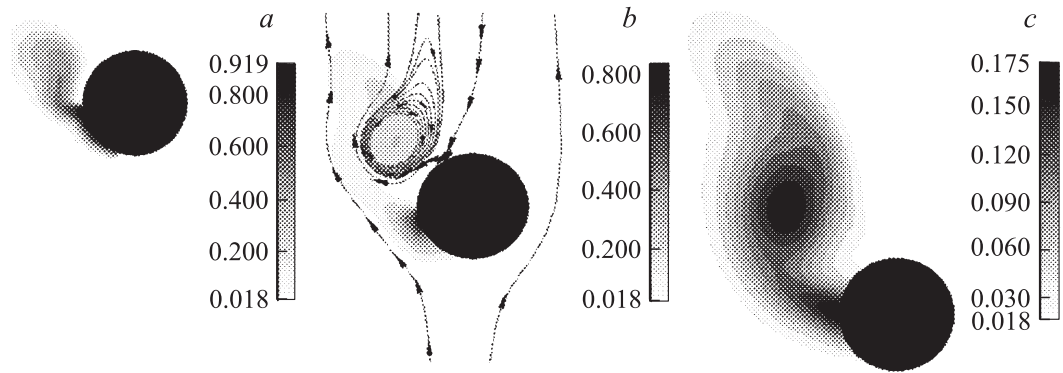


**Рис. 1.** Зависимость длины горизонтального смещения капли от мощности лазерного луча: 1 — экспериментальная кривая, 2, 3 — расчетные.

взрывного кипения, необходимо знание величины коэффициента конденсации воды. Для выяснения этой величины были проведены расчеты длины горизонтального смещения капли  $L$  с использованием системы уравнений (1)–(10). Рассмотрено два значения величины коэффициента конденсации  $\gamma = 0.04$  [8]; 1.0 [9].

Отметим, что в [10] для определения коэффициента конденсации  $\gamma$  проводилось одномерное моделирование испарения воды для условий оптико-акустических экспериментов [11]. Расчеты для  $\gamma = 0.04$  и  $\gamma = 1.0$  дали амплитуды давления отдачи в пределах ошибки эксперимента.

На рис. 1 показаны расчетные и экспериментальные зависимости горизонтального отлета капли от мощности луча, полученные в данной работе. Видно, что наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных наблюдается для  $\gamma = 0.04$ . Для  $\gamma = 1.0$  существенное расхождение расчета и эксперимента получено даже для низких значений мощности луча (до 80 W), где примененная нами модель наиболее адекватна из-за низкой вероятности неучтенных эффектов взрывного кипения.



**Рис. 2.** Распределение массовой доли молекул воды:  $a$  —  $t = 4.35$  ms,  $c$  —  $t = 11.75$  ms;  $b$  — линии тока воздуха вокруг капли и распределение массовой доли молекул воды,  $t = 7.35$  ms.

На рис. 2, *a–c* представлены распределения массовой доли молекул воды, испаренных с поверхности капли, полученные с использованием уравнений (1)–(6) для трех моментов времени, отсчитываемых от начала взаимодействия (общее время взаимодействия равно  $\tau = 8.7 \cdot 10^{-3}$  s). Интенсивный выплеск паров и форма их облака согласуется с фотографическими наблюдениями за процессом. Расчеты показывают, что около поверхности образуется перенасыщенный пар. Его конденсация в зоне луча маловероятна [7] из-за высокой степени поглощения водой излучения CO<sub>2</sub>-лазера, что подтверждается измерениями мощности излучения, прошедшего облако испаренной воды [1].

Из выполненных расчетов следует, что модель (1)–(10) адекватно описывает ряд наблюдаемых экспериментальных эффектов при  $\gamma = 0.04$ . Поэтому данное значение коэффициента конденсации было использовано при анализе причины прекращения деполимеризации амилопектина при превышении мощностью луча порога  $Q \approx 80$  W. А именно, из анализа расчетных распределений температуры в поверхностном слое капли можно сделать вывод, что по мере повышения мощности луча температура поверхностного слоя достигает уровня, при котором во время взаимодействия начинается взрывное кипение. Фронт кипения распространяется вверх по капле по мере ее падения. В этом случае уменьшается неравновесный перегрев поверхностного слоя капли, с которым, как показано в [1], связана деформация молекул амилопектина.

**Выводы.** Построена математическая модель, описывающая воздействие луча CO<sub>2</sub>-лазера на свободно падающую каплю воды. Проведены эксперименты по определению смещения капли от луча, численный анализ которых выявил наиболее вероятное значение коэффициента конденсации воды  $\gamma = 0.04$ . Расчеты температурного поля в поверхностном слое капли позволили сделать вывод о том, что прекращение процесса деполимеризации амилопектина, растворенного в капле, пролетающей через лазерный луч, может быть связано с началом взрывного кипения поверхностного слоя.

Авторы выражают благодарность доценту Государственного института точной механики и оптики А.С. Сегалю за полезные замечания, высказанные при обсуждении гетерогенных систем, а также сотрудникам Института проблем машиноведения РАН — академику Н.Ф. Морозову и д.ф.-м.н., проф. Д.А. Индейцеву за творческое участие в обсуждении модели процесса.

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

## Список литературы

- [1] Баранов Г.А., Беляев А.А., Оникиенко С.Б., Смирнов С.А., Хухарев В.В. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 8. В. 17. С. 25–30.
- [2] Бэтчелор Дж.К. Успехи микрогидродинамики // Труды XIV Международного конгресса IUTAM. М.: Мир, 1979. С. 136–187.
- [3] Fiedorowicz M., Tomasik P. // Carbohydrate Polymers. 2001. V. 45 (1). P. 79–87.
- [4] 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 г. М., 2001. С. 15–16.
- [5] Алексеев Б.В., Гришин А.М. Физическая газодинамика реагирующих сред. М.: Высш. школа, 1985. 464 с.
- [6] Латин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука, 1989. 368 с.
- [7] Ковалев В.И. // Труды Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР. Инфракрасные лазеры с когерентной накачкой и лучевая стойкость оптических материалов. 1982. Т. 136. С. 51–117.
- [8] Кнаке О., Странски И.Н. // УФН. 1959. Т. 68. № 2. С. 261.
- [9] Неизвестный А.Н. // УФН. 1978. Т. 243. № 3. С. 626.
- [10] Корнеев В.В. // Теплофизика высоких температур. 1990. Т. 28. № 3. С. 536–539.
- [11] Витиас А.Ф., Корнеев В.В., Лобанов А.Н. и др. // ТВТ. 1987. Т. 25. № 2. С. 312.