

УДК 519.6

В.В. Заболотин, Л.А. Уварова, Н.М. Батраков, Т.В. Карлова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОЙ СРЕДЫ¹

Выполнено численное моделирование взаимодействия лазерного излучения с дисперсными частицами при различных температурах поверхностного слоя морей и океанов. Получены форма и амплитуда акустического сигнала, образованного при этом взаимодействии. По результатам оценки амплитуды акустического давления построена ее зависимость от температуры поверхностного слоя жидкости.

Ключевые слова: дисперсные частицы, лазерное излучение, температура, поверхностный слой жидкости, оптоакустика, электромагнитные волны.

Одной из актуальных проблем современной физики дисперсных сред является проблема взаимодействия электромагнитного излучения с дисперсными системами (атмосферными аэрозолями, различными коллоидными растворами и т.п.). При этом может происходить нагрев частиц или, в зависимости от различных условий, изменение их агрегатного состояния. На практике такие задачи важны, например, при создании каналов просветления в атмосфере посредством воздействия интенсивного лазерного излучения на системы атмосферных дисперсных частиц. Актуальность этих задач также связана с возможностью создания сильнопоглощающих композитных материалов с заранее заданными электродинамическими характеристиками для нужд лазерной физики и оптоакустики. Еще одним из важных направлений исследования дисперсных систем является изучение осаждения атмосферных или антропогенных аэрозолей на поверхность водных бассейнов.

Давно известно, что действие модулированного по интенсивности электромагнитного излучения (лазерного излучения) на поверхность жидкой среды вызывает в ней возмущения, сопровождающиеся излучением звука. Этот эффект был открыт А. Беллом в 1881 г. и описан также в работах В. Рентгена и Д.Тиндаля, но вскоре был надолго забыт. Новый этап в исследовании оптоакустического эффекта и возможностей его применения для анализа конденсированных сред начался с появлением лазеров. На процесс генерации акустической волны в первую очередь влияет величина объемной плотности выделившейся в веществе энергии, а также режимы ее выделения (тепловое расширение, электрострикция, поверхностное испарение, взрывное вскипание, оптический пробой) [1; 2].

На поверхности жидкости очень часто происходит осаждение дисперсных частиц различной природы, что приводит к изменению оптических свойств самой жидкости. Оптические свойства таких дисперсных систем обусловлены взаимодействием электромагнитного излучения, обладающего определенной энергией, с частицами дисперсной фазы. Особенности оптических свойств дисперсных систем определяются природой частиц, их размерами, соотношением между длиной волны электромагнитного излучения и размерами частиц.

Поверхностный слой морей и океанов выполняет функции терморегулятора Земли, что, в свою очередь, сказывается на температуре поверхности этих вод. Температура поверхностных вод колеблется в пределах от $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура замерзания) до $29\text{ }^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая температура поверхностных вод Мирового океана составляет $17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем в Северном полушарии она примерно на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем в Южном. Наибольшая температу-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1441).

ра поверхностных океанских вод в Северном полушарии - в августе, а наименьшая - в феврале.

В тропических и умеренных широтах температура поверхностного слоя морей и океанов в основном зависит от течений. Так, благодаря теплым течениям в тропических широтах на западе океанов температуры на 5-7 °С выше, чем на востоке. Однако в Северном полушарии вследствие теплых течений на востоке океанов температуры весь год положительные, а на западе из-за холодных течений вода зимой замерзает. В высоких широтах температура во время полярного дня составляет около 0 °С, а во время полярной ночи (подо льдом) - около -1,5 °С.

При моделировании взаимодействия лазерного излучения с дисперсными частицами на поверхности морей и океанов необходимо учитывать температуру поверхностного слоя, зависящую от широты местности, наличия течений, времени года.

Математическая модель. Рассмотрим следующую модельную задачу. На поверхности жидкости находятся дисперсные частицы, представляющие собой металлические частицы в виде шара радиусом R , равномерно распределенные по поверхности жидкости. В начальный момент времени они подвергаются воздействию модулированного по интенсивности лазерного излучения (рис.1). Различная начальная температура поверхностного слоя жидкости будет влиять на решение тепловой задачи, а следовательно, и на процесс оптической генерации звука. Это приведет к особенностям численного счета и модификациям алгоритмов решения задачи.

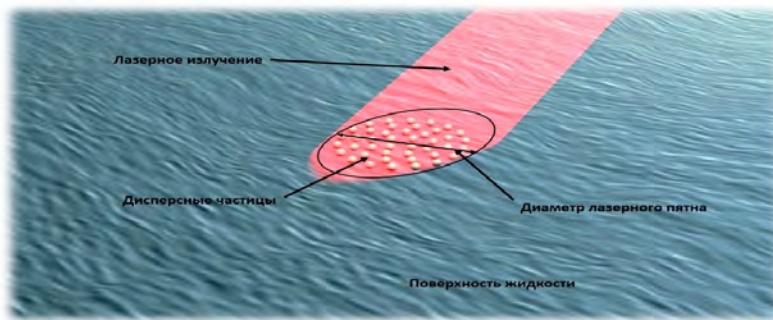


Рис. 1. Геометрия задачи

На основе теории Ми [3] определяется внутреннее электромагнитное поле дисперсных частиц и поглощенная ими энергия. После определения поглощенной энергии можно найти источник тепла для вычисления температуры частиц и среды (воды в данном случае) из уравнения теплопроводности. Из уравнения оптической генерации звука по изменению температуры жидкости вычисляется акустическое давление.

Соответствующая система дифференциальных уравнений с начальными и краевыми условиями приведена в табл. 1.

Таблица 1

Система дифференциальных уравнений

Уравнение теплопроводности	Уравнение оптической генерации звука
$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \Delta T = Q$	$\frac{1}{c_{\text{зв}}^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = 2\pi f \beta \frac{\partial T}{\partial t}$
Начальные условия	
$T_0 = 272..300 \text{ K}$	$p_0 = 0$
Граничные условия	
$-n(-k\nabla T) = 0$	$p' = 0$

Примечания: 1. p — акустическое давление; ρ — плотность; k — коэффициент температуропроводности жидкости; $c_{\text{зв}}^2$ — скорость звука в жидкости; β — коэффициент теплового расширения жидкости; C_p — удельная теплоемкость жидкости; Q — плотность мощности тепловых источников звука. 2. $p' = 0$ — на поверхности обращается в ноль приращение звукового давления для свободной поверхности.

Для моделирования взаимодействия лазерного излучения с дисперсными частицами при различной начальной температуре поверхностного слоя жидкости использовались значения параметров и физических констант [4], приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметров и физических констант

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Лазерное излучение			
Диаметр пятна	d	2	мм
Интенсивность	I	10^8	Вт/м ²
Длина волны	λ	5	мкм
Частота модуляции	f	1000	Гц
Индекс модуляции	m	1	-
Жидкая среда			
Жидкость	Вода		
Скорость звука	$c_{зв}$	1500	м/с
Плотность	ρ	1000	кг/м ³
Коэффициент температуропроводности	k	0,618	Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость	c_p	3450	Дж/(кг·К)
Показатель поглощения	α	81 200	1/м
Коэффициент теплового расширения	β	0,0045	1/К
Дисперсные частицы			
Материал	Серебро		
Коэффициент температуропроводности	k_1	427	Вт/(м·К)
Плотность	ρ_1	10500	кг/м ³
Удельная теплоемкость	c_{p_1}	234	Дж/(кг·К)
Диаметр	d_1	20	мкм
Распределение	Равномерное		
Показатель поглощения	α_1	$88,65 \cdot 10^7$	1/м
Расстояние между частицами	l	50	мкм
Коэффициент отражения излучения	R	0,95	-
Поверхностный слой жидкости			
Начальная температура	T_0	272...300	К

Примечания: 1. Показатель поглощения света веществом определяется соотношением

$$\alpha = -4\pi nk/\lambda, \text{ где } n \text{ и } k \text{ — оптические постоянные для длины волны } \lambda. 2. R_{\omega} := \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}.$$

Результаты численного эксперимента. В результате численного эксперимента была получена зависимость амплитуды акустического сигнала от начальной температуры поверхности жидкости (рис. 2).

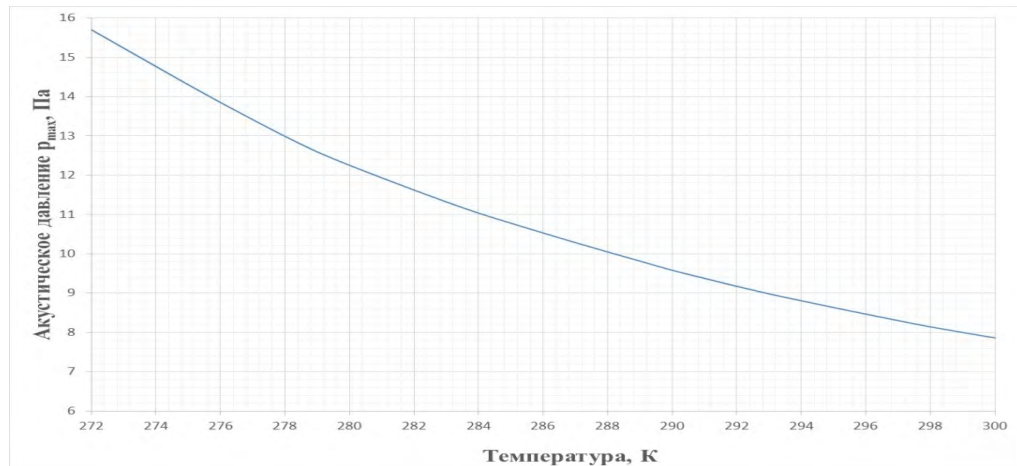


Рис. 2. Изменение амплитуды акустического сигнала в зависимости от начальной температуры поверхностного слоя жидкости

Из проведенного численного эксперимента и построенной на его результатах зависимости максимальной амплитуды звукового давления от начальной температуры поверхностного слоя жидкой среды можно сделать вывод, что присутствует нелинейная зависимость между этими параметрами. При изменении температуры поверхностного слоя жидкости на 1 К амплитуда акустического сигнала уменьшается в пределах 1,7-3,2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев, В.Э. Лазерная оптоакустика / В.Э. Гусев, А.А. Карабугов. - М.: Наука, 1991.
2. Лямшев, Л.М. Лазеры в акустике / Л.М. Лямшев // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 153.
3. Борн, М. Основы оптики / М.Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973.
4. Кикоин, И.А. Справочник физических величин / И.А. Кикоин. – М.: Атомиздат, 1976.

Материал поступил в редколлегию 10.07.15.