

УДК 519.6+53.097

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-12-21

Л.А. Уварова, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова,
С.А. Шептунов, Т.В. Карлова, А.Ю. Бекмешов

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ И НАНОСИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ ЧАСТИЦЫ СФЕРИЧЕСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Рассмотрен перенос электромагнитного излучения в системах сферических и цилиндрических дисперсных частиц с различными оптическими характеристиками. Методом конечных элементов произведен расчет температурного поля для системы сферических частиц в двумерном приближении. Рассмотрена возможность управления процессом теплопереноса в таких системах. Предложен численный метод определения плотности тепловых

источников для двух сферических частиц. Метод применим как для частиц с постоянными оптическими характеристиками, так и для частиц, диэлектрическая проницаемость которых следует закону Керра или зависит от четных степеней модуля электрического вектора.

Ключевые слова: дисперсные системы, электромагнитное излучение, теплоперенос, метод конечных элементов, управление, наночастицы.

L.A. Uvarova, I.V. Krivenko, M.A. Smirnova,
S.A. Sheptunov, T.V. Karlova, A.Yu. Bekmeshov

TRANSFER PROCESSES IN DISPERSION SYSTEMS AND NANO-SYSTEMS CONTAINING SPHERICAL AND CYLINDRICAL PARTICLES

There is considered a transfer of electromagnetic emission in the systems of spherical dispersion particles with different optical characteristics. A numerical method for definition of thermal source density for two spherical particles is offered. The method is applicable both for particles with constant optical characteristics, and for particles the dielectric permittivity of which follows Kerr's Law or depends upon even degrees of the module of an electric vector.

A model of electromagnetic emission transfer in cylindrical particles having inclusions of other chemical composition is developed. The substance of the inclusion differs considerably from the material of the particle by a factor of emission absorption for the wave length under consideration in long-wavelength approximation. For the calculation of a temperature field of the spherical particle system in two-dimensional approximation there was used a finite element method. The configurations of the particle location of the sys-

tem were chosen in a random way; as typical dimensions of the system there were considered longitudinal and transverse diameters of clusters, the distance between the centers of two largest particles and similar natural geometrical properties.

A possibility for heat transfer control in such systems is considered. It follows from our model calculations obtained that both electromagnetic and thermal interaction of dispersion articles may be visible at larger distances between their centers; that close to the border of a dispersion particle there is a thermal surface layer of the particle, where temperature distribution bears considerably a heterogeneous character. It is defined that in a poly-dispersion system the impact of group effects can change temperature by one and a half times and more.

Key words: dispersion systems, electromagnetic emission, heat transfer, finite element method, control, nano-particles.

Введение

В современной действительности все большую актуальность приобретает разработка эффективных способов воздействия на дисперсные системы (в том числе и наносистемы) с различными физико-химическими свойствами [1- 4]. Это связано как с глобальной экологической про-

блемой загрязнения атмосферы, когда аэрозоли с их огромной суммарной поверхностью оказывают существенное влияние на все физико-химические процессы в атмосфере, так и с развитием современного производства, на различных технологических стадиях которого используются

дисперсные вещества [5]. В качестве управляющего фактора рассматриваются электромагнитные поля и исследуются процессы переноса электромагнитного излучения и тепла в дисперсных системах, подвергающихся интенсивному электромагнитному воздействию. При управлении технологическим процессом необходимо учитывать нелинейный характер зависимости различных характеристик дисперсных частиц от температуры, векторов электромагнитного поля и др. Так, исследования взаимодействия лазерного излучения с дисперсными частицами необходимы для решения таких практических задач как:

- получение веществ с заданными свойствами;
- конструирование двигателей (жидкостно-реактивных и внутреннего сгорания);
- конструирование аппаратов химических производств;
- моделирование процессов в атмосфере (таких, как создание зон просветления лазерным излучением).

При рассмотрении наносистем необходимо учесть, что по форме наночастицы условно можно разделить на следующие группы:

- трехмерные (три размера в нанодиапазоне), например коллоидные растворы, эмульсии, кристаллы, капли, пузырьки;
- двумерные (один размер находится в нанодиапазоне, другие могут быть сколь угодно велики) тонкие плёнки;
- одномерные частицы (поперечные размеры - в нанодиапазоне, а длина может быть велика), например, к ним можно отнести игольчатые аэрозоли, нанотрубки и др.

На основе изучения данных о реальных дисперсных системах и наносистемах использованы такие модели дисперсных частиц как сфера и цилиндр, являющиеся предельными случаями их форм. В работах [6, 10-12] рассмотрены задачи взаимодействия электромагнитных волн с поглощающими излучение аэрозольными частицами и наночастицами со следующими характеристиками:

- две однородные взаимодействующие сферические частицы;
- уединенная сферическая частица, имеющая неоднородное включение;
- коллективы сферических однородных частиц одинаковых радиусов;
- коллективы сферических однородных частиц различных радиусов;
- коллективы сферических неоднородных частиц одинаковых радиусов;
- коллективы сферических неоднородных частиц различных радиусов;
- пара однородных по составу цилиндрических частиц;
- пара неоднородных по составу цилиндрических частиц с коаксиальными и не коаксиальными включениями.

В работе [6] рассматривались дисперсные системы «капли воды в воздухе», при этом их форма полагалась сферической (отметим, что при определенном воздействии некоторых факторов - взаимодействия капель, электромагнитного излучения - капли становятся сфероидальными). Задача взаимодействия электромагнитного излучения с двумя каплями сферической формы, даже при условии их взаимодействия, может быть решена аналитически [6]. Для дисперсных частиц цилиндрической формы при определенных условиях тоже могут быть получены аналитические решения [6, 7]. Отметим, что реальные аэрозольные системы содержат полидисперсные частицы в твердой фазе, имеющие неоднородную структуру. Аналитическое решение систем уравнений переноса (Максвелла (если дисперсная система находится в электромагнитном поле), теплопереноса, Навье-Стокса) оказывается чрезвычайно громоздким, и расчеты необходимо проводить численно (задача, как правило, является нелинейной). В разделе 1 настоящей работы описывается способ расчета тепловых источников внутри поглощающих частиц с учетом влияния соседней частицы, полученный на основе теории Ми. В общем случае частицы полагаются оптически нелинейными, а именно, подчиняющимися закону Керра. Раздел 2 посвящен решению уравнения Лапласа в длинноволновом приближении, находя-

нию напряженности электромагнитного поля внутри вытянутых цилиндрических частиц и определению инициированных электромагнитным полем источников тепла. В разделе 3 проведен расчет температуры в неоднородных дисперсных части-

цах в полидисперсных системах методом конечных элементов. Тепловые источники определяются на основе решения задачи о взаимодействии электромагнитного поля с частицами.

Перенос электромагнитного излучения в системе сферических частиц

Рассматриваются парные взаимодействия сферических дисперсных частиц, находящихся под воздействием монохроматического электромагнитного излучения. Поглощенная частицами энергия электромагнитного поля, выделяющаяся в единицу объема j -ой частицы в единицу времени, представляет собой тепловой источник q_j , инициированный излучением и определяется значением квадрата модуля амплитуды вектора напряженности электрического вектора в данной точке [1]. Ранее разработан метод расчета компонент векторов напряженности электромагнитного поля на основе теории Ми [8] и теории представления групп [9]. Для решения задачи связываем с центрами частиц O_1 и O_2 радиусами R_1 и R_2 и направлениями векторов \vec{E} (напряженности внешнего электромагнитного поля) и \vec{k} (волнового вектора) декартовой системой координат (рис. 1) [9].

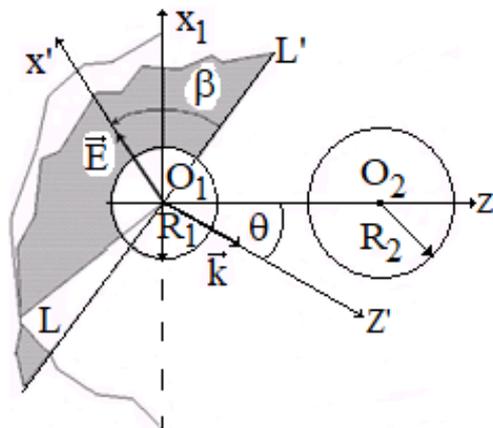


Рис. 1. Система двух частиц в поле электромагнитного излучения

Электрический вектор падающей волны зависит от времени по гармоническому закону и для его амплитуды можно записать [10]:

$$\Delta E + k^{(j)2} E = 0, \quad (1)$$

где $k^{(j)}$ - волновое число в веществе j , $k^2 = -k_1 k_2$, $k_1 = \frac{i\omega}{c} (\varepsilon + i \frac{4\pi\sigma}{\omega})$, $k_2 = i \frac{\omega}{c}$,

ω - циклическая частота, ε - диэлектрическая проницаемость среды, σ - удельная проводимость, c - скорость света. Число j принимает значения: $j=0$ (внешняя среда), $j=1$ (частица № 1), $j=2$ (частица №2). Для магнитного вектора можно записать аналогичное уравнение. В общем случае диэлектрическая проницаемость зависит от электрического поля, то есть

$$\varepsilon_j = \varepsilon_{j0} + \alpha f(|E|), \quad \varepsilon_j = \varepsilon_{j0} + \alpha_j f(|E|),$$

где α - параметр нелинейности.

Учесть влияние k -й частицы можно, если представить внешнее по отношению к j -й частице поле \vec{E}_j в виде [8]

$$\vec{E}_j = \vec{E} + \vec{E}_k^s, \quad (2)$$

где \vec{E} представляет собой вектор падающей волны, \vec{E}_k^s - волны, рассеянной на соседней частице. Векторы \vec{E} и \vec{H} можно представить через электрический U и магнитный V потенциалы Дебая [6]. Потенциалы Дебая поля падающего излучения выражены в системе координат $x'y'z'$, а потенциалы Дебая поля, рассеянного на k -й частице в системе координат $x_k y_k z_k$ ($k=1,2$). Далее полученные выражения представляются в виде разложений по собственным сферическим функциям j -й сферы $P_n^m(\cos \theta_j) e^{im\phi}$. Углы поворота Эйлера $\pi/2 - \beta, \theta, 3\pi/2$ полностью определяют вращение g относительно точки O_1 , переводящее систему координат $x'y'z'$ в систему $x_1 y_1 z_1$. Данный подход может быть применен и для частиц с нелинейными свойствами, однако уравнения для определения полей имеют другой вид. Полагая, что параметр линеаризации можно рассматривать как малый параметр, получим в нелинейном случае неоднородные уравнения Гельм-

гольца для определения электрического вектора. Действительно, рассматривая нелинейную зависимость Керра для амплитуды вектора электрической напряженности в каждой частице, уравнения для \vec{E} в каждой из частиц будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{E} + k^2 (\hat{\varepsilon} + \tilde{\alpha} |\vec{E}|^2) \vec{E} &= \vec{\nabla}(\nabla \vec{E}) \\ \vec{\nabla}(k(\hat{\varepsilon} + \tilde{\alpha} |\vec{E}|^2) \vec{E}) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где $\hat{\varepsilon}$ - комплексная диэлектрическая проницаемость, $\tilde{\alpha} = \alpha / |\vec{E}_0|^2$. Система (3) линеаризуется, если величина $\tilde{\alpha}$ является малым параметром и соответственно, $\vec{E} = \vec{E}' + \tilde{\alpha} \vec{E}''$. При этом основная часть электрического уравнения определяется на основе уравнения (1), а для \vec{E}'' получается неоднородное уравнение Гельмгольца с правой частью:

$$\vec{F}(\vec{E}') = -k^2 |\vec{E}'|^2 \vec{E}' - \frac{1}{\hat{\varepsilon}} \vec{\nabla}(\vec{\nabla}(|\vec{E}'|^2 \vec{E}')).$$

Частное решение такого уравнения может быть найдено с использованием разложения правой части по собственным функциям решения уравнения (1). Вклад полученного частного решения отражается на величине коэффициентов рассеяния и поглощения.

Отметим, что полученные решения могут быть использованы и при рассмотрении наночастиц относительно больших размеров. Однако при рассмотрении наночастиц с диаметром порядка нескольких наноразмеров необходимо учитывать вклад продольных волн в общую величину электрического поля.

Для определения результатов воздействия электромагнитного поля на частицу или каплю, прежде всего её нагрев в результате поглощения воздействующей электромагнитной волны, необходимо решать уравнения теплопроводности с соответствующим тепловым источником электромагнитной природы.

Для расчета источника тепла частица разбивается на малые объемы, внутри которого $|\vec{E}|^2$ практически постоянно. Используя такую схему, мы рассчитываем

средние по объему частицы значения плотности источников тепла, отнесенные к интенсивности падающей волны q^* для различных ориентаций системы частиц относительно векторов поля и различных параметров нелинейности при выбранном законе нелинейности, например закон Керра. Такой метод ввиду выше приведенной правой части неоднородного уравнения Гельмгольца оказывается весьма эффективным и для численного определения теплового источника в каждой из частиц. В таблице в качестве примера приведены расчеты для частиц водного аэрозоля радиусами $R_1 = R_2 = 1$ мкм. Расстояние между центрами частиц $R = 20$ мкм. Длина волны инициирующего теплоперенос лазерного излучения $\lambda = 10.6$ мкм. Температура окружающей среды $T = 273$ К. Коэффициент теплопроводности среды $\chi_e = 24,1$ мВт/(мК), коэффициенты теплопроводности вещества частиц равны $\chi_1 = \chi_2 = 566$ мВт/мК. Значения комплексных показателей преломления вещества частиц (воды) $1.173 + i \cdot 0.0823$. Показатель преломления среды $n_e = 1$. В данном случае коэффициент нелинейности очень мал (10^{-5}) и почти не влияет на величину тепловых источников.

Таблица
Зависимость q^* от углов Эйлера

θ , град	β , град	$q_j^* \cdot 10^{-4}$, м ⁻¹
90	0	8,7
90	90	5,7
45	45	6,3

Из расчетов следует [11], что средняя плотность источников тепла зависит от расположения линии, соединяющей центры двух частиц относительно вектора напряженности электрического поля и волнового вектора. Даже на больших расстояниях между частицами это расположение является значимым.

Ранее в работах [10-12] было показано, что не только электромагнитное, но и тепловое взаимодействие дисперсных частиц может быть заметным и при больших расстояниях между их центрами. Проведенные указанным методом расчеты пока-

зывают, что вблизи границы дисперсной частицы распределение носит более неоднородный характер, чем в центральных областях, что позволяет говорить о суще-

ствовании теплового поверхностного слоя частицы, который характеризуется сильно неоднородным температурным полем в его объеме.

Распространение электромагнитного излучения в системе двух вытянутых одномерных частиц (цилиндров)

Другой распространенной геометрической моделью дисперсных частиц является цилиндр или вытянутый сфероид. Разработанный нами метод расчета квадрата амплитуды для данной геометрии [11] применим при условии, когда радиус цилиндров много меньше длины волны падающего излучения. Такое ограничение позволяет использовать для решения бицилиндрическую систему координат, что значительно упрощает решение и расчеты [13, 14].

Для указанных систем частиц проведены расчеты отношения величин $|\vec{E}|^2/|\vec{E}_0|^2$ (то есть отношения квадрата модуля амплитуды светового вектора в выбранной точке внутри частицы к квадрату модуля амплитуды вектора напряженности электрического поля падающей волны), характеризующего плотность источников тепла в зависимости от радиуса и угловой координаты в сечениях, перпендикулярных оси цилиндра.

Рассмотрены системы неоднородных по составу цилиндров с различными значениями комплексной диэлектрической проницаемости вещества частицы. При расчетах использовались следующие значения: $\lambda = 2$ мм; $\varepsilon_1 = 1$ (для воздуха); $\varepsilon_2 = 1,33 - 0,0009i$ (для льда).

Проведены вычислительные эксперименты для двухслойных цилиндров с концентрическими (ранее в работе [11]) и неконцентрическими слоями (внутренняя область частицы представляет собой структуру со случайно распределенным радиусом в зависимости от угла по сечению цилиндра) различного химического состава.

На рис. 2 изображена система неоднородных цилиндров. Здесь τ , σ – криво-

линейные бицилиндрические координаты. Полярное расстояние обозначено через a , радиус цилиндра – R_0 , половина расстояния между цилиндрами – R , световой вектор падающей плоской монохроматической электромагнитной волны – \vec{E}_0 , координатная поверхность цилиндра в бицилиндрической системе координат – τ_1 . Данное решение формально сводится к приведенному в работе [11], но здесь ра-

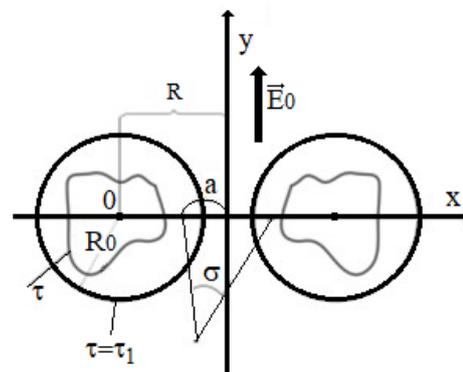


Рис. 2. Система цилиндров с неконцентрическими слоями

диус внутренней границы задается заново для каждой рассматриваемой точки.

Найдены распределения величины $b = |\vec{E}|^2/|\vec{E}_0|^2$ внутри цилиндрической частицы радиуса $R_0 = 1$ мкм при радиусе окружности выбранного сечения 0.95 мкм со случайным распределением внутренней границы внешнего слоя. В этом случае точка окружности может принадлежать как внешнему, так и внутреннему слою. Были выбраны следующие значения комплексной диэлектрической проницаемости: для внутреннего слоя – диэлектрическая проницаемость для льда; для внешнего – модельные значения, соответствующие сильному поглощению.

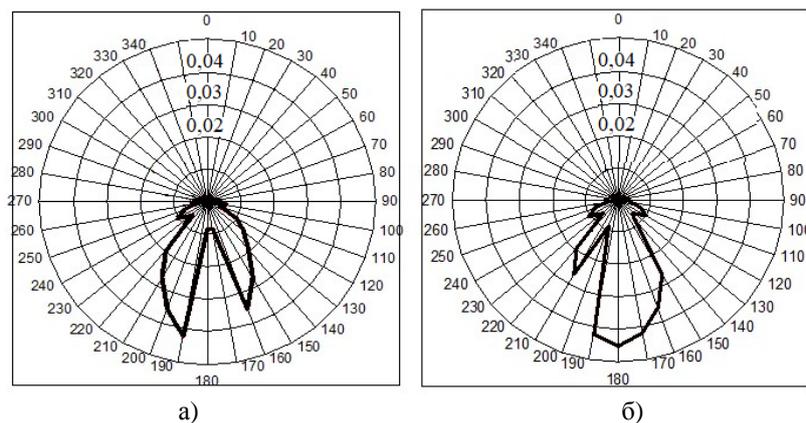
Рис. 3. Распределение величины b по сечению цилиндра

Рис. 3а,б соответствуют различным конфигурациям внутренней границы внешнего слоя, выбранной случайным образом. Полученные распределения имеют форму, зависящую от толщины внешнего

слоя в выбранной точке, и вписываются в диаграмму, рассчитанную для радиуса внутренней границы внешнего слоя, соответствующей минимальной толщине внешнего слоя.

Теплоперенос в дисперсных системах с различной структурой и конфигурацией

В разделе 1 был предложен метод расчета плотности теплового источника, обусловленного поглощением при воздействии на частицу электромагнитной волны. Метод применим как для частиц с постоянными оптическими характеристиками, так и для частиц, диэлектрическая проницаемость которых следует закону Керра или зависит от четных степеней модуля электрического вектора. Для определения температуры нагреваемых частиц под действием тепловых источников электромагнитной природы использовался метод конечных элементов. Тепловые источники определялись с использованием результатов задачи взаимодействия электромагнитных волн с частицами. В модельных схемах рассмотрены сферические частицы реальных для природных аэрозолей размеров, однако разработанная программа позволяет проводить расчеты и для частиц произвольной формы.

Использовалась схема, представляющая собой прямоугольную площадку (90 на 70 мкм) с размещенными на ней сферическими частицами радиуса 5 и 10 мкм. Количество частиц варьировалось от одной до девяти, расположение частиц на площадке также варьировалось.

Основные результаты исследования процесса теплопереноса в дисперсных си-

стемах с однородными по составу частицами под действием произвольно заданных тепловых источников опубликованы в работе [12]. Проводились расчеты температурного поля и для систем, содержащих частицы различного химического состава.

Из анализа результатов вычислительных экспериментов следует, что присутствие частиц различных по размерам и теплофизическим свойствам приводит к увеличению неоднородности температурного поля в системе, причем при линейной зависимости источника от температуры проявляются нелинейные эффекты, а при нелинейной зависимости эти эффекты усиливаются. Если система полидисперсная, то существенное влияние на такое распределение оказывает присутствие более крупных частиц, а при граничных условиях третьего рода на внешней границе системы влияние коллективных эффектов может изменять температуру в 1,5 и более раз. Это влияние тем больше, чем система более неоднородна (по размеру частиц и составу).

На основе общего подхода к решению задачи оптимизации процесса теплопереноса в системе из N частиц, обусловленного тепловыми источниками в каждой частице, получены расчетные формулы для определения оптимальных параметров

конфигурации системы из двух сферических частиц и оптимального внешнего воздействия. Характерные результаты численных модельных расчетов по полученным формулам приведены в [11, 12]. При решении задачи оптимизации использовались решения задачи теплопереноса под действием электромагнитного излучения для двух сферических частиц [10, 11]. В расчетах использовались такие управляющие параметры, как мощность внешнего электромагнитного источника, определяемого из задачи электродинамики, и конфигурация расположения частиц.

Найден минимум функционала для соответствующей системы с распределенными параметрами. Так как конфигурации расположения частиц выбирались произвольно, что существенно усложняло расчеты, то в качестве характерных размеров системы рассматривались продольный и поперечный диаметры скопления частиц, расстояние между центрами двух наиболее крупных частиц и подобные естественные геометрические характеристики. Варьировались размеры частиц, вещество частиц и некоторые другие величины.

Мы полагали, что процесс теплопереноса в такой системе является квазистационарным, и рассматривали последовательную оптимизацию, считая, что в этом случае необходимо минимизировать следующий функционал [6]

$$\int_{\Omega+\Gamma} |T(r) - T_3(r)|^2 dr \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $T_3(r)$ - заданная температура. Другие варианты минимизации функционала представлены в работах [11, 12]. Полагая, что поверхности всех частиц имеют одинаковую температуру (на основе второго закона термодинамики), последнее выражение преобразуем к виду:

$$|T(S_i) - T_3| \rightarrow \min \quad (4)$$

Для системы «две сферические частицы - непрерывная среда» в [11, 12] было получено аналитическое решение для распределения температуры в системе из двух частиц в бисферической системе координат. Дифференцируя это решение, мы получили уравнения для экстремальных параметров задачи: $q_1^*, q_2^*, a_1^*, a_2^*$ (где q_i^* - средние по объему частицы плотности тепловых источников, a_i^* - радиусы частиц), что соответствует решению задачи оптимизации (4). В качестве управляющего параметра можно рассматривать среднее по объёму значение теплового источника (в частном случае, мощность внешнего воздействия, например, лазерного воздействия) и расстояние между центрами сфер или осями цилиндров (в ортогональной плоскости к осям). Решение для случая двух сферических частиц, где в качестве управляющего параметра выбрана мощность источника I и расстояние между двумя центрами сфер d , было получено в работах [11, 12].

Решая системы уравнений

$$\frac{\partial T_i}{\partial q_i} = 0, \quad T_i = T_3, \quad \frac{\partial T_i}{\partial a_i} = 0, \quad T_i = T_3, \quad (5)$$

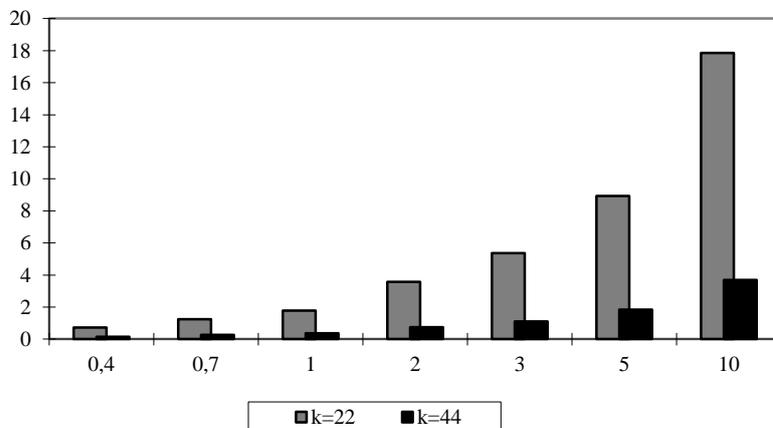


Рис. 4. Оптимальная зависимость радиуса частицы от отношения тепловых источников при $\eta = \pi/3, m = 10, v = 5, k = 22; 44$

можно определить оптимальные параметры. При численных модельных расчетах полагалось, что $\xi = \xi_i$ (на поверхности частицы). Для уменьшения числа параметров вводились величины [6]

$$k = \frac{d}{a_1}, m = \frac{a_2}{a_1}, p = \frac{q_2}{q_1}, v = \frac{\mathfrak{N}_1}{\mathfrak{N}_e}. \quad (6)$$

Из полученных результатов расчета отношения источников для системы «вода-воздух» следует, что зависимость источника от координаты η является немонотонной.

В последние годы проводилось интенсивное исследование кластеров, имеющих прямое отношение к процессам ассоциации твердых частиц (образованию кластеров в облаках, коагуляции частиц в дымах, образованию структур при релаксации металлического пара и т.д.) числен-

Заключение

1. Из проведенных расчетов для системы двух сферических частиц следует, что среднее значение плотности источников тепла существенно зависит от расположения системы двух частиц относительно волнового вектора и вектора напряженности электрического поля. Показано, что даже на больших расстояниях между частицами влияние второй частицы на распределение плотности источников тепла по объему первой значительно. Не только электромагнитное, но и тепловое взаимодействие дисперсных частиц может быть заметным при больших расстояниях между их центрами. Расчеты показывают, что вблизи границы дисперсной частицы распределение температуры носит более неоднородный характер, чем в центральных областях, что позволяет нам говорить о существовании теплового поверхностного слоя частицы, который характеризуется сильно неоднородным температурным полем в его объеме.

2. Предложен численный метод определения плотности тепловых источников для двух сферических частиц. Метод применим как для частиц с постоянными оптическими характеристиками, так

Параметры варьировались в пределах: $k = 2 \div 500$, $m = 0.01 \div 100$.

В процессе численного моделирования было установлено, что оптимальные значения отношений характерных размеров частиц зависят от вещества частиц, их оптических свойств и геометрии системы. Характерные диаграммы таких зависимостей приведены на рис. 4.

ными методами. Так, было получено, что при воздействии на крупную аэрозольную частицу размером порядка 10-100 мкм лазерным излучением большой мощности, частица распадается на несколько осколков (образуется кластер). Если внутренняя энергия таких осколков близка к внутренней энергии систем, описываемых уравнениями сплошной среды, то предложенная теория может быть использована для описания теплопереноса в системах, включающих кластеры.

и для частиц, диэлектрическая проницаемость которых следует закону Керра или зависит от четных степеней модуля электрического вектора.

3. Проведенные вычислительные эксперименты для двухслойных цилиндров с концентрическими и неконцентрическими слоями различного химического состава со случайным образом выбранной внутренней границей между слоями показывают, что распределение плотности внутренних источников тепла (пропорциональных квадрату амплитуды электрического вектора поглощенного поля) в зависимости от угла в полярной системе координат, имеют на выбранном сечении форму, определяемую размером внешнего слоя и вписывается в диаграмму, рассчитанную для радиуса внутренней границы внешнего слоя, соответствующей минимальной толщине внешнего слоя.

4. Из анализа результатов численных экспериментов, выполненных на основе метода конечных элементов и проведенных для изучения переноса тепла в дисперсных системах, содержащих частицы, отличающиеся по составу, конфигурации и размерам следует, что в таких неоднород-

ных системах возрастает неоднородность температурного поля, причем даже при линейной зависимости источника от температуры проявляются нелинейные эффекты, а при нелинейной зависимости эти эффекты усиливаются. Если система полидисперсная, то существенное влияние на такое распределение оказывает присут-

ствие более крупных частиц, а если на поверхности частиц реализуются граничные условия третьего рода, влияние коллективных эффектов может изменять температуру в 1,5 и более раз. Это влияние тем больше, чем система более неоднородна (по размеру частиц и составу).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пришивалко, А.П. Оптические и тепловые поля внутри светорассеивающих частиц / А.П.Пришивалко. - Мн.: Наука и техника, 1983. - 190 с.
2. Лушников, А.А. Физико-химические процессы образования атмосферных аэрозолей / А.А. Лушников, А.А. Загайнов, И.Е. Аграновский, Ю.С. Любовцева // Журнал физической химии. - 2008. - Т.82. - № 10. - С. 1950-1958.
3. Лушников, А.А. Начальная стадия образования аэрозоля из пересыщенных паров / А.А. Лушников, В.А. Загайнов, Ю.С. Любовцева // Журнал физической химии. - 2018. - Т.92. - № 3. - С. 501-507.
4. Лушников, А.А. Образование наноаэрозолей в тропосфере под действием космического излучения / А.А. Лушников, В.А. Загайнов, Ю.С. Любовцева, А.Д. Гвишиани // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2014. - Т.50. - № 2. - С.175-184.
5. Barakov, A. V. Study of heat and mass transfer in the dryer with a pseudo liquefied layer of a disperse material / A. V. Barakov, A. P. Byrdin, A. A. Nadeev // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture And Civil Engineering. Construction And Architecture. - 2016. - Vol.3. - № 31. - P.18-26.
6. Кривенко, И.В. Моделирование воздействия электромагнитного излучения на природные аэрозоли / И.В. Кривенко, М.А. Смирнова // Математическая физика и компьютерное моделирование. - 2019. - Т. 22. - № 4. - С. 64-79.
7. Смирнова, М.А. Теплоперенос в дисперсных системах различного состава и конфигураций: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.физ.-мат.наук: 02.00.04 / М. А. Смирнова. - Тверь, 2000. - 24 с.: ил. библиогр.: С. 22-24.
8. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. - М.: Наука, 1970. - 850 с.
9. Виленкин, Н.Я. Специальные функции и теория представления групп / Н.Я. Виленкин - М.: Наука, 1956. - 588 с.
10. Гамаюнов, Н.И. Особенности распространения электромагнитного излучения и инициированного им теплопереноса в системе «аэрозольные частицы - окружающая среда» / Н.И. Гамаюнов, И.В. Кривенко, Л.А. Уварова, Ю.З. Бондарев // Журнал физической химии. - 1997. - Т.71. - № 2. - С.2270-2274.
11. Uvarova, L.A. Modeling of Heat Transfer in the System of Small Spherical and Cylindrical Particles under the Action Electromagnetic Radiation / L.A. Uvarova, I.V. Krivenko, M.A. Smirnova, A.F. Ivannikov // Nonlinearity: Problems, Solutions and Applications / ed. L.A. Uvarova. - NY: Nova Science Publishers, Inc, 2017. - С. 519-541.
12. Уварова, Л.А. Малые поглощающие частицы в электромагнитном поле и теплоперенос в дисперсных системах / Л.А. Уварова [и др]. - М.: Янус-К, 2014. - 192 с.
13. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн. - М.: Наука, 1984. - С. 831.
14. Морс, Ф.М. Методы теоретической физики / Ф.М. Морс, Г. Фешбах. - М.: Изд-во иностр. литературы, 1958. - С. 415.
1. Prishivalko, A.P. Optical and thermal fields within light-diffusing particles / A.P. Prishivalko. - Mн.: Science and Engineering, 1983. - pp. 190.
2. Lushnikov, A.A. Physical and chemical processes of atmospheric aerosol formation / A.A. Lushnikov, A.A. Zagainov, I.E. Agranovsky, Yu.S. Lyubovtseva // Journal of Physical Chemistry. - 2008. - Vol.82. - No.10. - pp. 1950-1958.
3. Lushnikov, A.A. Initial stage of aerosol formation of supersaturated vapors / A.A. Lushnikov, V.A. Zagainov, Yu.S. Lyubovtseva // Journal of Physical Chemistry. - 2018. - Vol.92. - No.3. - pp. 501-507.
4. Lushnikov, A.A. Nano-aerosol formation in troposphere under the influence of cosmic radiation / A.A. Lushnikov, V.A. Zagainov, Yu.S. Lyubovtseva, A.D. Gvishiany // Proceedings of RAS. Physics of Atmosphere and Ocean. - 2014. - Vol.50. - No.2. - pp. 175-184.
5. Barakov, A. V. Study of heat and mass transfer in the dryer with a pseudo liquefied layer of a disperse material / A. V. Barakov, A. P. Byrdin, A. A. Nadeev // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture And Civil Engineering. Construction And Architecture. - 2016. - Vol.3. - № 31. - P.18-26. Krivenko, I.V. Modeling of electromagnetic emission impact upon natural aerosols / I.V. Krivenko, M.A. Smirnova // Mathematical Physics and Computer Simulation. - 2019. - Vol.22. - No.4. - pp. 64-79.
6. Smirnova, M.A. Heat Transfer in Dispersed Systems of Different Structure and Configuration: au-

- thor's abstract of the thesis for Can. Sc. Physical-Math. Degree 02.00.04. / M.A. Smirnova. – Tver, 2000. – pp. 24.
7. Born, M. *Optics Fundamentals* / M. Born, E. Wolf. – M.: Science, 1970. – pp. 850.
 8. Vilenkin, N.Ya. *Special Functions and Theory of Group Presentation* / N.Ya. Vilenkin – M.: Science, 1956. – pp. 588.
 9. Gamayunov, N.I. Peculiarities of electromagnetic emission propagation and heat transfer initiated by it in system of “aerosol particles – environment” N.I. Gamayunov, I.V. Krivenko, L.A. Uvarova, Yu.Z. Bondarev // *Journal of Physical Chemistry*. – 1997. – Vol.71. – No.2. – pp. 2270-2274.
 10. Uvarova, L.A. Modeling of Heat Transfer in the System of Small Spherical and Cylindrical Particles under the Action Electromagnetic Radiation / L.A. Uvarova, I.V. Krivenko, M.A. Smirnova, A.F. Ivannikov // *Nonlinearity: Problems, Solutions and Applications* / ed. L.A. Uvarova. - NY: Nova Science Publishers, Inc, 2017. - С. 519-541.
 11. Uvarova, L.A. *Small Absorbing Particles in Electromagnetic Field and Heat Transfer in Dispersed Systems* / L.A. Uvarova [et al.]. – M.: Janus-K, 2014. – pp. 192.
 12. Corn, G. *Reference Book on Mathematics for Scientific Workers and Engineers* / G. Corn. – M.: Science, 1984. – pp. 831.
 13. Mors, F.M. *Methods of Theoretical Physics* / F.M. Mors, G. Feschbach. – M.: Foreign Literature Publishers, 1958. – pp. 415.

Ссылка цитирования:

Уварова, Л.А. Процессы переноса в дисперсных системах и наносистемах, содержащих частицы сферической и цилиндрической формы / Л.А. Уварова, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.А. Шептунов, Т.В. Карлова, А.Ю. Бекмешов // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2020. - № 10. – С. 12-21. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-12-21.

Статья поступила в редакцию 6.05.20.

Рецензент: д. физ.-мат. н., доцент,
Брянского государственного
технического университета

Демидов А.А.

Статья принята к публикации 30.09.20.

Сведения об авторах:

Уварова Людмила Александровна, д.т.н., профессор, Институт конструкторско-технологической информатики РАН (ИКИ РАН), e-mail: uvar11@yandex.ru.

Кривенко Ирина Валерьевна, к.физ.-мат.н., доцент кафедры «Общая физика», Тверской государственный технический университет, тел.: +7-910-937-94-29, e-mail: krivenko-irina@mail.ru.

Смирнова Марина Анатольевна, к.физ.-мат.н., доцент кафедры «Общая физика», Тверской государственный технический университет, тел.: +7-910-649-74-50, e-mail: mar-smir@yandex.ru.

Uvarova Lyudmila Alexandrovna, Dr. Sc. Tech., Prof. Institute of Design-Technological Informatics of RAS (IKTI RAS), e-mail: uvar11@yandex.ru.

Krivenko Irina Valerievna, Can. Sc. Phys.-Math., Assistant Prof. of the Dep. “General Physics”, Tver State Technical University, e-mail: krivenko-irina@mail.ru.

Smirnova Marina Anatolievna, Can. Sc. Phys.-Math., Assistant Prof. of the Dep. “General Physics”, Tver State Technical University, e-mail: mar-smir@yandex.ru.

Шептунов Сергей Александрович, д.т.н., директор Института конструкторско-технологической информатики РАН, тел. +7 (499)- 978-57-15, e-mail: ship@ikti.ru.

Карлова Татьяна Владимировна, д.соц.н., профессор, вед. науч. сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, тел. +7-903-776-90-78, e-mail: karlova-t@yandex.ru.

Бекмешов Александр Юрьевич, к.т.н., доцент, Институт конструкторско-технологической информатики РАН, тел.: 8-926-582-34-35, e-mail: b-a-y-555@yandex.ru.

Sheptunov Sergey Alexandrovich, Dr. Sc. Tech., Director of Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: ship@ikti.ru.

Karlova Tatiana Vladimirovna, Dr. Sc. Sociol, Prof., Leading research assistant of Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: karlova-t@yandex.ru.

Bekmeshov Alexander Yurievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: b-a-y-555@yandex.ru.