

ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК СФЕРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В. К. Пустовалов¹, Л. Г. Астафьева^{2*}

УДК 535.34:620.3

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-4-470-476>

¹ Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

² Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь;
e-mail: astafev@dragon.bas-net.by

(Поступила 11 мая 2022)

Теоретически рассчитаны и исследованы зависимости факторов эффективности поглощения излучения сферическими наночастицами системы ядро–оболочка с материалами золото–кварц и кварц–золото с радиусами ядра $r_0 = 40, 50, 60, 70$ нм и толщиной оболочки $\Delta r_1 = 10, 20, 30$ нм в диапазоне длин волн 300–3000 нм при температурах частиц и окружающего кварца $T = 300, 1173$ К. Установлено значительное изменение поглощения излучения наночастицей при возрастании температур наночастиц и окружающей среды. Изменение оптических характеристик наночастиц оказывает определяющее влияние на эффективность поглощения энергии солнечного или оптического излучения наночастицами, температуру нагрева наночастиц и окружающей среды и последующие тепловые процессы. Результаты представляют интерес для целей создания высокотемпературных твердотельных наноструктурированных абсорберов солнечного излучения, содержащих поглощающие излучение наночастицы, а также при создании новых материалов для высокотемпературной нанофотоники.

Ключевые слова: наночастица, оптические свойства, температура, солнечное излучение, абсорбер.

The dependences of the efficiency factors of radiation absorption by spherical hybrid nanoparticles of the core-shell system, respectively, with gold-quartz and quartz-gold materials with core radii $r_0 = 40, 50, 60, 70$ nm and shell thicknesses $\Delta r_1 = 10, 20, 30$ nm in the wavelength range of 300–3000 nm at temperatures of particles and surrounding quartz $T = 300, 1173$ K are theoretically calculated and studied. Essential change of radiation absorption by a nanoparticle is established with an increase of temperatures of nanoparticles and environment. The change of optical properties of nanoparticles significantly influences the efficiency of energy absorption of solar or optical radiation by nanoparticles, heating temperature of nanoparticles and environment and further thermal processes. The results are interesting for purposes of creation of high-temperature solid nanostructured absorbers of solar radiation containing absorbing radiation of a nanoparticle and also for creation of new materials for high-temperature nanophotonics.

Keywords: nanoparticle, optical properties, temperature, solar radiation, absorber.

Введение. В последние годы активно исследуется применение наночастиц (НЧ) для поглощения солнечной радиации в тепловой энергетике, для фототермических нанотехнологий и высокотемпературной нанофотоники [1–17]. Для энергетических применений с целью повышения поглощения солнечного света используются различные НЧ в жидкостях (воде) [1–3]. При этом для целей горячего водоснабжения нагрев воды осуществляется до 373 К (100 °С), для получения водяного пара вода

DEPENDENCE OF OPTICAL PROPERTIES OF TWO-LAYERED METAL-DIELECTRIC SPHERICAL NANOPARTICLES ON TEMPERATURE

V. K. Pustovalov¹, L. G. Astafyeva^{2*} (¹ Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus;

² B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: astafev@dragon.bas-net.by)

нагревается сильнее [1—3]. Предложены наноструктурированные твердотельные поглотители с поглощающими НЧ и прозрачной твердой матрицей для эффективного поглощения солнечной энергии. Большое внимание уделяется использованию НЧ, размещенных в таких твердых средах, как стекла, керметы и т. д. [4—7], для увеличения эффективности поглощения энергии излучения. Использование концентраторов солнечного излучения (линз Френеля, зеркал) приводит к увеличению интенсивности излучения в сотни раз. Это связано с возможностью нагреть НЧ и материал абсорбера при воздействии сфокусированного солнечного излучения до существенно более высоких температур (≥ 1000 К), что приводит к резкому увеличению поглощения солнечной энергии и повышению эффективности использования энергии. Использование твердотельной прозрачной матрицы с селективно подобранными НЧ в высокотемпературных нанофотонике и технологиях позволяет разрабатывать новые приборы [8—10], фототермопреобразователи солнечной энергии в электрическую [11—13], наноструктурированные абсорберы света [15—17] и эмиттеры для переизлучения тепловой энергии [11, 18] и т. д.

Под действием интенсивного оптического (солнечного) излучения на наноструктурированные твердые поглотители энергия излучения поглощается НЧ и затем передается окружению за счет теплопроводности. При температурах $T \geq 1000$ К эффективно использование термостойких прозрачных материалов — плавленого кварца, стекла, керамики [4—7].

Поверхностный плазмонный резонанс определяет эффективность поглощения и рассеяния излучения НЧ [17, 18]. Максимальное поглощение солнечной энергии и последующее преобразование в тепловую реализуются в случае высокого поглощения излучения НЧ. Для этих целей в качестве НЧ применяются однородные металлические и другие частицы, а также гибридные двухслойные и многослойные НЧ. Для определения оптических свойств НЧ в [1—16] использовались постоянные оптические параметры материалов НЧ при начальной температуре [19].

Взаимодействие интенсивного оптического излучения с НЧ представляет интерес для различных применений в высокотемпературных оптических нанотехнологиях, солнечной наноэнергетике [1—16], что предполагает их использование при высоких температурах нагрева НЧ и окружающих сред. Под действием непрерывного солнечного излучения до одинаковых высоких температур нагреваются НЧ, поглощающие солнечную энергию, и за счет их теплоотдачи окружающий материал. Кроме того, оптические параметры материалов НЧ и окружения (показатели оптического поглощения и преломления) зависят от температуры. Учет зависимости оптических параметров НЧ и матрицы от температуры их нагрева может приводить к изменению поглощения и рассеяния излучения НЧ по сравнению с этими параметрами при начальной температуре и к изменению эффективности поглощения и нагрева. Исследование зависимости оптических характеристик НЧ от температуры для целей высокотемпературных нанофотоники и других технологий представляет научный и практический интерес. Разрыв между имеющимися данными [4—16] и потребностями в использовании НЧ при высоких температурах с соответствующими оптическими свойствами требует изучения оптических свойств потенциально подходящих НЧ, которые могут применяться для эффективного поглощения и преобразования солнечной энергии при высоких температурах.

Цель настоящей работы — исследование зависимости оптических свойств НЧ от температуры в интервале 300—1200 К под действием интенсивного солнечного и оптического излучений на основе компьютерного моделирования. Недостаточное количество данных по показателям преломления металлов, материалов и по оптическим свойствам НЧ при высоких температурах ограничивает возможности исследования.

Для эффективного поглощения солнечного излучения с максимальной интенсивностью на длине волны $\lambda_{\text{max}} \sim 550$ нм можно использовать гомогенные металлические (Au, Ti, W, Ni и др.) НЧ. Длина волны плазмонного резонанса для многих металлических НЧ далека от максимума интенсивности солнечного излучения, что не позволяет использовать их для указанных целей. В [20] исследована зависимость оптических свойств некоторых металлических НЧ от температуры.

Особый интерес вызывают гибридные двухслойные (многослойные) сферические НЧ [21—28]. Двухслойные НЧ представляют собой систему из сферических ядра радиусом r_0 и сферической оболочки толщиной Δr_1 из разных материалов (металлов). В работах [21—25] в качестве материала ядра взят кварц SiO_2 , оболочки — Au. Данные НЧ обладают большими возможностями перестройки оптического спектра поглощения в широком диапазоне длин волн и успешно используются для поглощения солнечного излучения и других целей. В то же время исследование двухслойных НЧ, состоящих из металлического ядра Au и оболочки SiO_2 , полезно для улучшения и манипуляции резонансами

плазменного спектра НЧ [26—28]. Оптические свойства НЧ Au-SiO₂ не исследовались для целей поглощения солнечного излучения.

Температуры плавления НЧ или материала матрицы определяют максимальную температуру нагрева поглотителя интенсивным оптическим излучением. Максимальная рассматриваемая температура золота и кварца $T = 1173$ К меньше температур плавления золота $T_{\text{пл}} = 1336$ К и размягчения кварца $T_{\text{пл}} = 1670$ К [29], что позволяет использовать данные результаты в практических целях.

Рассмотрим оптические характеристики одиночной НЧ при облучении, инициирующем неравновесные процессы нагрева НЧ. Фактор эффективности поглощения излучения НЧ K_{abs} [18] определяет количество поглощенной энергии и характеризуется показателями преломления (рефракции) n и поглощения k материалов НЧ системы ядро-оболочка. При этом данные показатели существенно изменяются при нагреве материала (металла). Показатели преломления и поглощения ряда металлов в твердом состоянии при начальной температуре ~ 300 К приведены в [19]. Для некоторых диапазонов длин волн и температур показатели для определенных металлов и материалов приведены в [30—32]. В настоящей работе исследованы оптические свойства сферических ядро-оболочка НЧ, размещенных в кварце, на основе компьютерного моделирования для их применения в поглощении солнечного излучения.

Результаты и их обсуждение. Факторы эффективности поглощения K_{abs} излучения с длиной волны λ описывают оптические свойства сферической НЧ радиусом r_0 [18]. Компьютерное моделирование факторов эффективности поглощения K_{abs} солнечной радиации в зависимости от λ в диапазоне 200—3000 нм НЧ с золотым ядром и кварцевой оболочкой (Au-SiO₂) и наоборот (SiO₂-Au) проведено на основе обобщенной теории Ми [18]. Использованы двухслойные НЧ с радиусами ядер $r_0 = 40$ —70 нм и толщиной оболочки $\Delta r_1 = 10, 20, 30$ нм.

Для эффективного поглощения солнечного излучения в диапазоне 200—3000 нм необходимо, чтобы зависимость $K_{\text{abs}}(\lambda)$ была близка к зависимости интенсивности солнечного излучения $I_{S0}(\lambda)$. Эффективное поглощение энергии солнечного излучения НЧ и ее максимальный нагрев определяются интегралом $\Delta T_0 \sim r_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{S0}(\lambda) K_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda$ [31], откуда следует сделанный выше вывод. Это связано

с необходимостью поглощения во всем спектре падающего излучения для каждой длины волны. Зависимость интенсивности оптического излучения I_{S0} от длины волны λ на уровне моря можно представить в виде спектра излучения черного тела [33]. Градуировка правой шкалы ординат на рис. 1 выбрана таким образом, чтобы максимумы K_{abs} и I_{S0} примерно совпадали по величине для наглядного сопоставления зависимостей $K_{\text{abs}}(\lambda)$ и $I_{S0}(\lambda)$.

На рис. 1 представлены зависимости фактора эффективности поглощения K_{abs} излучения сферическими двухслойными Au-SiO₂ НЧ с радиусами ядер $r_0 = 40$ —70 нм и толщиной оболочки $\Delta r_1 = 10, 20, 30$ нм, размещенными в кварце, и интенсивности солнечного излучения I_{S0} в диапазоне $\lambda = 200$ —3000 нм при температурах НЧ и кварца 300 и 1173 К. Зависимости показателей преломления и поглощения золота и кварца в указанном диапазоне длин волн для данных температур взяты из [30, 31]. Видны также ярко выраженные максимумы фактора эффективности K_{abs} , обусловленные поверхностным плазмонным резонансом, причем расположены они в области максимальной интенсивности излучения при ~ 550 нм. Плазмонный резонанс электромагнитного (солнечного) излучения НЧ определяет его поглощение. С ростом Δr_1 от 10 до 30 нм при $r_0 = 60$ нм максимальные значения K_{abs} уменьшаются от 1.5 до 0.9, с ростом r_0 от 40 до 60 нм при $\Delta r_1 = 20$ нм K_{abs} уменьшаются от 1.65 до 1.20. Увеличение температуры в указанных пределах приводит к слабому (для $r_0 = 40, 50$ нм) и заметному сдвигу (для $r_0 = 60$ нм) зависимости $K_{\text{abs}}(\lambda)$ в сторону больших λ при $\Delta r_1 = 10, 20, 30$ нм. Это несколько увеличивает эффективность поглощения солнечного излучения данными НЧ. Таким образом, использование данных НЧ при повышенных температурах увеличивает поглощение излучения. В то же время НЧ при указанных $r_0, \Delta r_1$ слабо удовлетворяют основному условию близости $K_{\text{abs}}(\lambda)$ и $I_{S0}(\lambda)$, причем увеличение $r_0, \Delta r_1$ в определенных пределах не приводит к существенному улучшению ситуации. Отметим, что расчет проводился по программе для двухслойных НЧ с учетом размеров ядра и оболочки, что приводит к зависимости фактора эффективности поглощения от толщины оболочки, несмотря на близость оптических индексов для оболочки и окружения.

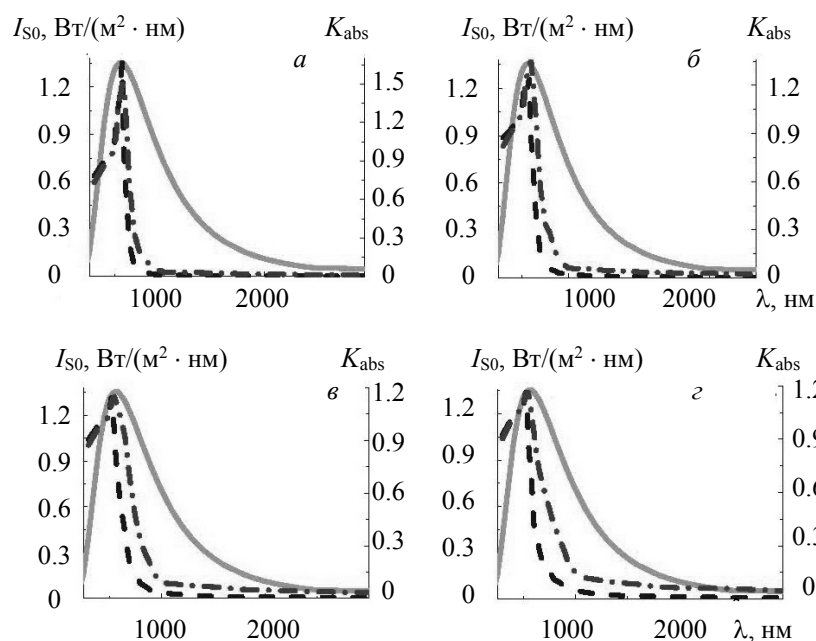


Рис. 1. Зависимости фактора эффективности поглощения K_{abs} излучения сферическими двухслойными Au-SiO₂ наночастицами с $r_0 = 40$ (а), 50 (б), 60 (в), 70 нм (г), $\Delta r_1 = 20$ нм, при температурах наночастиц и кварца 300 К (штриховые линии) и 1173 К (штрихпунктир) и интенсивности солнечного излучения I_{S0} (сплошные линии) от λ

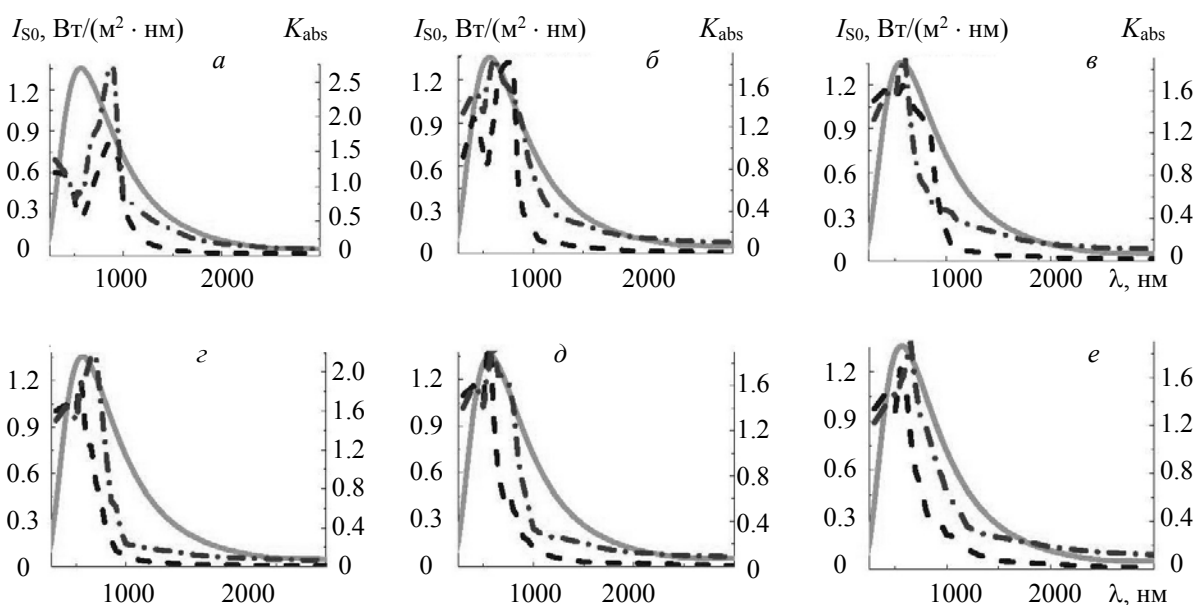


Рис. 2. Зависимости фактора эффективности поглощения K_{abs} излучения сферическими двухслойными SiO₂-Au наночастицами с $r_0 = 60$ нм, $\Delta r_1 = 10$ (а), 20 (б), 30 нм (в) и $\Delta r_1 = 20$ нм, $r_0 = 40$ (г), 50 (д), 60 (б), 70 нм (е) при температурах наночастиц и кварца 300 К (штриховые линии) и 1173 К (штрихпунктир) и интенсивности солнечного излучения I_{S0} (сплошные линии) от λ

На рис. 2 представлены зависимости фактора эффективности поглощения K_{abs} излучения сферическими двухслойными SiO₂-Au НЧ с радиусами ядер $r_0 = 40$ —70 нм и толщиной оболочки $\Delta r_1 = 10$, 20, 30 нм, размещенными в кварце, и интенсивности солнечного излучения I_{S0} в диапазоне $\lambda = 200$ —3000 нм при температурах НЧ и кварца 300 и 1173 К. Зависимости $K_{\text{abs}}(\lambda)$ для $T = 300$ и 1173 К имеют ряд общих особенностей для всех радиусов r_0 . Отметим, что влияние температуры

до 1173 К одинаково для всех $K_{\text{abs}}(\lambda)$. Сдвиг зависимости $K_{\text{abs}}(\lambda)$ к кривой $I_{\text{S0}}(\lambda)$ способствует увеличению эффективности поглощения. Влияние толщины оболочки Δr_1 при постоянном $r_0 = 60$ нм представлено на рис. 2, *a—в*. С ростом Δr_1 от 10 до 30 нм при $r_0 = 60$ нм максимальные значения K_{abs} уменьшаются от 2.60 до 1.75. При этом зависимость I_{S0} , при $\Delta r_1 = 20$ нм наиболее близка к $I_{\text{S0}}(\lambda)$. Рассмотрим поведение $K_{\text{abs}}(\lambda)$ в зависимости от r_0 . На рис. 2, *г—е* представлены зависимости $K_{\text{abs}}(\lambda)$ для $\Delta r_1 = 20$ нм, $r_0 = 40, 50, 60, 70$ нм. Для НЧ с $r_0 = 60$ и 70 нм смещение зависимостей $K_{\text{abs}}(\lambda)$ для $T = 1173$ К по сравнению с $T = 300$ К существенно. С ростом r_0 от 40 до 70 нм при $\Delta r_1 = 20$ нм K_{abs} уменьшаются от 2.05 до 1.75.

Эффективность поглощения солнечной энергии НЧ с $r_0 = 60, 70$ нм, $\Delta r_1 = 20$ нм при $T = 1173$ К существенно выше, чем при других значениях $r_0, \Delta r_1$ для $T = 300$ и 1173 К, вследствие сдвига зависимостей $K_{\text{abs}}(\lambda)$ к $I_{\text{S0}}(\lambda)$. Поглощение энергии НЧ пропорционально $K_{\text{abs}}\pi r_0^2$, и определенное уменьшение K_{abs} компенсируется увеличением радиуса r_0 . Отметим, что дальнейшее увеличение радиуса r_0 не приводит к повышению эффективности поглощения в связи со сдвигом $K_{\text{abs}}(\lambda)$ правее кривой $I_{\text{S0}}(\lambda)$ в ИК-область спектра. При этом зависимость $K_{\text{abs}}(\lambda)$ близка к $I_{\text{S0}}(\lambda)$, что свидетельствует о возможности использования НЧ для эффективного поглощения энергии солнечного излучения. Увеличение температур приводит к росту поглощения до 15 % интегрально по спектру по сравнению с начальной температурой во всем диапазоне длин волн.

Поглощение излучения НЧ должно быть больше рассеяния (в приближении однократного рассеяния) для максимальной эффективности использования энергии излучения. Следовательно, параметр $P_1 = K_{\text{abs}}/K_{\text{sca}}$ должен быть больше единицы ($P_1 > 1$ (или $\gg 1$)), а фактор поглощения K_{abs} — больше (или намного больше в благоприятных случаях), чем фактор рассеяния K_{sca} . Это позволяет достичь максимальной эффективности взаимодействия солнечной радиации с НЧ для ее нагрева. Рассеяние солнечной радиации НЧ преобладает над поглощением для $P_1 < 1$.

На рис. 3 представлены зависимости фактора P_1 сферических двухслойных SiO_2 -Au НЧ с $r_0 = 60$ нм, $\Delta r_1 = 10, 20, 30$ нм и с $\Delta r_1 = 20$ нм, $r_0 = 40, 50, 60, 70$ нм при температурах НЧ и кварца 300 и 1173 К и интенсивности солнечного излучения I_{S0} от λ . Зависимости отражают изменения толщины оболочки Δr_1 при фиксированном радиусе ядра НЧ r_0 и радиуса ядра НЧ r_0 при фиксированной толщине оболочки Δr_1 . Представленные зависимости фактора P_1 имеют общую особенность — увеличение P_1 при росте температуры от 300 до 1173 К, особенно в ИК-области спектра

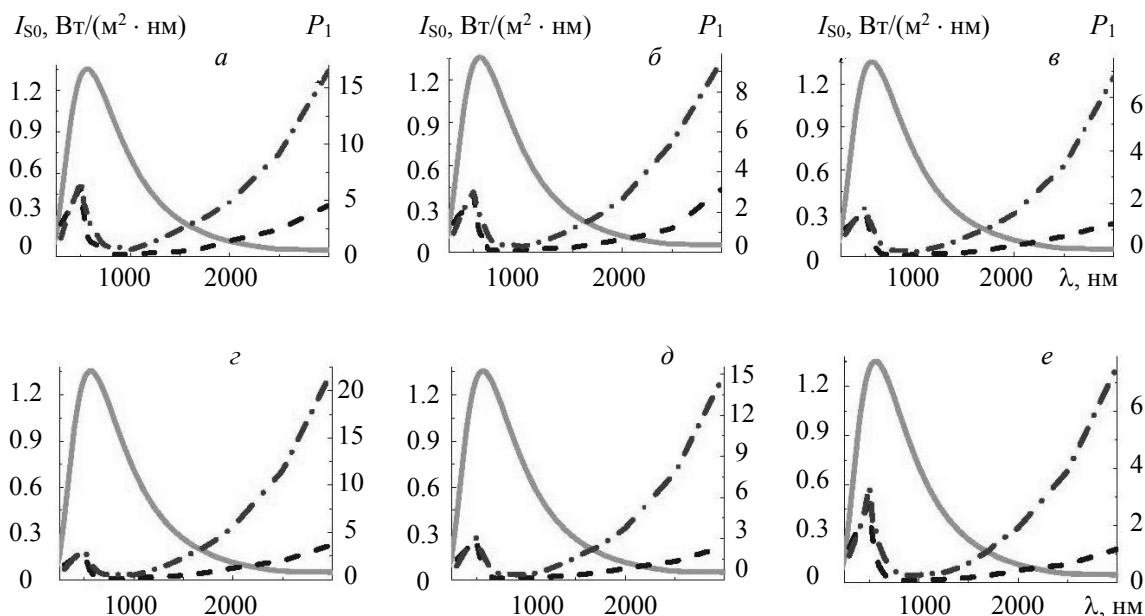


Рис. 3. Зависимости фактора P_1 сферических двухслойных SiO_2 -Au наночастиц с $r_0 = 60$ нм, $\Delta r_1 = 10$ (*a*), 20 (*б*), 30 нм (*в*), $r_0 = 40$ (*г*), 50 (*д*), 70 нм (*е*), $\Delta r_1 = 20$ нм при температурах наночастиц и кварца 300 К (штриховые линии) и 1173 К (штрихпунктир) и интенсивности солнечного излучения I_{S0} (сплошные линии) от λ

с увеличением λ . Данные результаты представляют интерес для изучения воздействия непрерывного оптического (солнечного) излучения на НЧ, размещенные в конденсированных средах, при существенной передаче тепла от НЧ окружающей среде и при практическом равенстве температур НЧ и среды.

Заключение. Выполнены расчеты и проведено исследование зависимостей факторов эффективности поглощения излучения сферическими наночастицами системы ядро–оболочка, размещенными в плавленом кварце, от температуры. Исследованы зависимости факторов поглощения K_{abs} и параметра P_1 двухслойных наночастиц ядро–оболочка (Au–SiO₂) и наоборот (SiO₂–Au) в диапазонах радиусов ядра $r_0 = 40\text{—}70$ нм, толщины оболочки $\Delta r_1 = 10\text{—}30$ нм, для длин волн $300\text{—}3000$ нм и температур $300, 1173$ К. Изменение оптических параметров при изменении температуры наночастиц и окружающей среды может оказывать существенное влияние на динамику нагрева наночастиц и последующие тепловые процессы. Трансформация оптических свойств наночастиц в зависимости от температуры и их общие и частные особенности с изменением параметров наночастиц и окружающей среды позволяют оценить степень этого влияния. Отметим, что в единственной теоретической работе [34] по исследованию влияния температуры на оптические свойства наночастиц рассмотрены гипотетические наночастицы с различными диэлектрическими проницаемостями в диапазоне температур $300\text{—}1000$ К.

Анализ результатов показывает, что наночастицы Au–SiO₂ не могут использоваться для эффективного поглощения солнечной радиации из-за низкого поглощения в ИК-области оптического спектра. Наночастицы ядро–оболочка SiO₂–Au с $r_0 = 60, 70$ нм, $\Delta r_1 = 20$ нм имеют достаточно высокий фактор поглощения $K_{\text{abs}}(\lambda)$, и зависимости $K_{\text{abs}}(\lambda)$ близки к спектральной зависимости солнечной радиации $I_{\text{so}}(\lambda)$ при повышении температуры. Это дает возможность эффективно использовать их при высоких температурах. Данные наночастицы также могут применяться в качестве хороших абсорбторов для эффективного поглощения солнечной радиации в высокотемпературных энергетических тепловых системах (прямые солнечные поглощающие коллекторы).

Окончательный выбор наиболее подходящих наночастиц может быть сделан путем комплексного анализа их свойств, который позволяет реализовать максимальное нагревание наночастиц. Зависимость оптических параметров наночастиц от температуры при взаимодействии интенсивного оптического и солнечного излучений с наночастицами представляет интерес для различных применений в высокотемпературных нанотехнологиях и нанофотонике, солнечной наноэнергетике.

- [1] M. Amjad, G. Raza, Y. Xin, S. Pervaiz, D. Wen. Appl. Energy, **206** (2017) 393—400
- [2] K. S. Reddy, N. R. Kamnapure, S. Srivastava. Int. J. Low-Carbon Technol., **12** (2017) 1—23
- [3] V. K. Pustovalov. Springer Nature Appl. Sci., **1** (2019) 356—384
- [4] F. Chen, B. Qiao, S. Dai, X. Zhang, W. Ji. Opt. Mater. Express, **8** (2018) 3197—3205
- [5] V. Renteria-Tapia, C. Velasquez-Ordóñez, M. Ojeda Martínez, E. Barrera-Calva, F. Gonzalez-Garcia. Energy Proc., **57** (2014) 2241—2248
- [6] J. D. Gao, C. Y. Zhao, B. X. Wang. J. Appl. Phys., **121** (2017) 113105
- [7] Y. Yeng, M. Ghebrebrhan, P. Bermel, W. Chan, J. Joannopoulos, M. Soljačić, I. Celanovic. Proc. National Academy of Sciences, **109** (2012) 2280—2285
- [8] I. Celanovic, M. Soljacic. J. Optics, **18** (2016) 36—37
- [9] P. Kumar, M. C. Mathpal, J. Prakash, G. Jagannath, W. D. Roos, H. C. Swart. Mater. Res. Bull., **125** (2020) 110799
- [10] A. Lenert, D. Bierman, Y. Nam, W. Chan, I. Celanović, M. Soljačić, E. Wang. Nature Nanotechnology, **9** (2014) 126—130
- [11] G. Huang, S. R. Curta, K. Wang, C. N. Markides. Nano Mater. Sci., **2** (2020) 183—203
- [12] P. Bermel. J. Optics, **18** (2016) 32—33
- [13] F. Cao, L. Tang, Y. Li, A. Litvinchuk, J. Bao, Z. Ren. Solar Energy Mater. Solar Cells, **160** (2017) 12—17
- [14] J. U. Kim, S. Lee, S. J. Kang, T. Kim. Nanoscale, **10** (2018) 21555—21574
- [15] L. Escoubas, M. Carlberg, J. Le Rouzo, F. Pourcin, J. Ackermann, O. Margeat, C. Reynaud, D. Duche, J.-J. Simon, R.-M. Sauvage, G. Berginc. Prog. Quantum Electron., **63** (2019) 1—22
- [16] I. Mayergoyz. Plasmon Resonances in Nanoparticles, Singapore, World Scientific Publishing (2013)
- [17] C. Bohren, D. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Wiley, New York (1983)
- [18] Refractive index database (2021), <http://refractiveindex.site/>

-
- [19] **B. K. Пустовалов, Л. Г. Астафьева.** *Опт. и спектр.*, **129** (2021) 307—313
 - [20] **R. Chaudhuri, S. Paria.** *Chem. Rev.*, **112** (2011) 2373—2433
 - [21] **R. Bardhan, N. Grady, T. Ali, N. Halas.** *ACS Nano*, **4** (2010) 6169—6179
 - [22] **K. Wang, Y. Wang, C. Wang, X. Jia, J. Li, R. Xiao, S. Wang.** *RSC Adv.*, **8** (2018) 30825—30831
 - [23] **Y.-C. Wang, É. Rhéaume, F. Lesage, A. Kakkar.** *Molecules*, **23** (2018) 2851—2883
 - [24] **V. Pustovalov, L. Astafyeva, B. Jean.** *Nanotechnology*, **20** (2009) 225105
 - [25] **A. Guerrero-Martinez, J. Perez-Juste, L. M. Liz-Marzan.** *Adv. Mater.*, **22** (2010) 1182—1195
 - [26] **H. Lee, Y. Yoo, Y.-H. Han.** *Scr. Mater.*, **55** (2006) 1127—1129
 - [27] **J. Liu, C. Kan, H. Xu, Y. Ni, Y. Li, D. Shi.** *Plasmonic*, **9** (2014) 1007—1014
 - [28] **F. Kreith, W. Black.** *Basic Heat Transfer*, New York, Harper and Row (1980)
 - [29] **L. N. Aksyutov.** *J. Appl. Spectrosc.*, **26** (1977) 656—662
 - [30] **J. Wray, J. Neu.** *JOSA*, **59** (1969) 774—781
 - [31] **V. K. Pustovalov.** *RSC Adv.*, **6** (2016) 81266—81273
 - [32] **M. Born, E. Wolf.** *Principles of Optics*, Oxford, Pergamon Press (1964)
 - [33] **N. Daneshfar.** *Phys. Plasmas*, **21** (2014) 063301