

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЖИДКОСТЕЙ С ОДНОРОДНЫМИ И ДВУХСЛОЙНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2017 г. В. К. Пустовалов*, Л. Г. Астафьева**^a

*Белорусский национальный технический университет, 220013 Минск, Беларусь

**Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 220072 Минск, Беларусь

^aE-mail: astafev@dragon.bas-net.by

Поступила в редакцию 20.02.2017 г.

Оптические свойства металлических (никель Ni и титан Ti) монодисперсных наночастиц с радиусами 50–100 нм и двухслойных наночастиц, состоящих из металлического ядра и сферической оболочки из окисла этого же металла, теоретически исследованы в спектральном интервале 250–2500 нм и проведен анализ результатов. Проведено исследование влияния параметров наночастиц (радиус, толщина оболочки наночастиц и т.д.) и окружающей жидкости (вода) на оптические сечения поглощения, рассеяния и ослабления излучения наночастицами. Установлено, что наночастицы систем Ti + TiO₂, Ni + NiO для определенных значений радиусов являются хорошими поглотителями, особенно в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном спектральном интервалах и могут быть использованы для целей солнечной тепловой энергетики.

DOI: 10.7868/S0030403417070200

ВВЕДЕНИЕ

Металлические наночастицы широко используются в солнечных и фототермических технологиях, основанных на поглощении солнечного излучения [1–25]. Поглощение солнечного излучения наночастицами используется в солнечных ячейках [1–10], для фотокаталитических реакций [11, 12], при использовании гетерогенных наножидкостей с наночастицами для энергетических применений [13–26], включая образование паров нанопузырей [22–26] и использование их в компактных солнечных автоклавах [26], и т.д.

В процессе начального контакта или при эксплуатации коллектора прямого солнечного облучения в результате контакта металлических наночастиц с воздухом, водой или паром происходит образование тонкой окисной пленки на поверхности наночастицы. Кроме того, в некоторых случаях окисная пленка создается первоначально на поверхности металлической частицы с целью предохранения наночастиц от контактов с химически активными жидкостями. В процессе воздействия оптического (солнечного) излучения на наночастицы, размещенные в некоторой жидкости, происходит ослабление излучения. Ослабление излучения наножидкостями включает в себя эффекты поглощения и рассеяния излучения. Поглощение излучения происходит за счет по-

глощения наночастицами и основной жидкостью. Рассеяние на наночастицах и молекулах жидкой среды приводит к некоторому перераспределению интенсивности в объеме наножидкости в зависимости от характеристик излучения и самой наножидкости. На отдельных наночастицах было показано, что рассеяние излучения существенно возрастает и даже становится больше, чем поглощение излучения наночастицами, при размерах наночастиц больше 50–100 нм.

Для некоторых нанотехнологий металлические наночастицы представляют особый интерес. Исследования плазмонных и оптических свойств металлических наночастиц были проведены в спектральном интервале 300–1200 нм [27–35] для применения в нанофотонике и других нанотехнологиях. Попытки найти “идеальные” или наиболее подходящие наночастицы для конкретных применений в нанотехнологиях были приняты в различных работах [36–39].

С другой стороны, сравнительный анализ оптимальных параметров различных металлических наночастиц для использования их как фототермических агентов солнечной нанотехнологии в спектральном интервале 250–2500 нм, составляющем 95% спектра энергии солнечного излучения, в настоящее время отсутствует. В данной работе мы представляем результаты анализа опти-

ческих свойств однородных металлических и двухслойных наночастиц металл–окисел для их применений в солнечных нанотехнологиях.

АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДНОРОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ДВУХСЛОЙНЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛ–ОКИСЕЛ

В работе проведен численный расчет оптических сечений поглощения σ_{abs} , рассеяния σ_{sca} и ослабления σ_{ext} солнечного излучения одиночными однородными и двухслойными наночастицами на основе теории Ми [27]. В качестве материалов однородных металлических наночастиц и металлического ядра двухслойных наночастиц были выбраны титан (Ti) и никель (Ni). Оптические характеристики этих металлов подходят для поглощения солнечного излучения в широких диапазонах длин волн, их максимум $\sigma_{abs}(\lambda)$ попадает на максимум $I_S(\lambda)$, приходящийся на 530 нм. В качестве материалов оболочки были выбраны окислы указанных металлов TiO_2 и NiO . Двухслойные наночастицы представляют собой систему из металлического ядра и сферической оболочки из окисла этого же металла. Проведены исследование и анализ оптических свойств наночастиц с радиусами ядра в диапазоне 50–100 нм и толщиной окисной оболочки $\Delta r_1 = 10$ нм в спектральном интервале излучения 250–2500 нм.

С другой стороны, в существующих экспериментальных и теоретических исследованиях коллекторов прямого солнечного нагрева используются однородные частицы окисных металлов [22, 25, 26]. Обоснование необходимости и эффективности использования таких окисных наночастиц практически отсутствует. В связи с этим было проведено исследование оптических характеристик чисто окисных наночастиц из TiO_2 , NiO . Оптические постоянные металлов, окислов и воды взяты из [41–43].

Рисунок 1 представляет спектральные зависимости оптических сечений поглощения σ_{abs} , рассеяния σ_{sca} и ослабления σ_{ext} излучения однородными наночастицами Ti и TiO_2 с $r_0 = 50, 75, 100$ нм и двухслойными наночастицами Ti + TiO_2 с $r_0 = 40, 65, 90$ нм и толщиной оболочки $\Delta r_1 = 10$ нм. Общий радиус наночастицы с окисной оболочкой равен радиусу соответствующей однородной наночастицы.

Возрастание r_0 ведет к существенному увеличению значений всех оптических сечений наночастиц. Увеличение размеров наночастиц Ti приводит к сдвигу положения максимальных значений σ_{abs} , σ_{sca} и σ_{ext} на оси λ в сторону больших

значений длин волн. Например, в случае $r_0 = 50$ нм максимальное значение поглощения $\sigma_{abs} = 1.6 \times 10^{-10}$ см² достигается при $\lambda = 490$ нм (рис. 1а), а для $r_0 = 100$ нм – $\sigma_{abs} = 4.5 \times 10^{-10}$ см² при $\lambda = 892$ нм (рис. 1в). Для наночастиц Ti + TiO_2 с возрастанием значения r_0 происходит сдвиг максимальных значений σ_{abs} , σ_{sca} и σ_{ext} в сторону больших значений длины волны. Значения σ_{abs} для наночастиц Ti с $r_0 = 50, 75$ нм больше, чем значения σ_{sca} в спектральном интервале 250–750 нм, и значения σ_{abs} больше, чем значения σ_{sca} для интервала 750–2500 нм. Появление окисной оболочки для наночастиц Ti + TiO_2 приводит к сдвигу положения λ_{abs}^{max} сечений σ_{abs}^{max} от примерно 350 нм для $r_0 = 50$ нм (рис. 1д) до примерно 815 нм для $r_0 = 100$ нм (рис. 1ж). Кроме того, с ростом r_0 появляются осцилляции зависимости σ_{abs} от λ . В частности, при $r_0 = 100$ нм образуются два максимума σ_{abs}^{max} при $\lambda \sim 550$ и 815 нм. Интересным фактом является образование для $r_0 = 65$ и 90 нм и $\Delta r_1 = 10$ достаточно резкого минимума σ_{sca} при $\lambda \sim 410$ нм и максимума σ_{sca} при $\lambda \sim 650$ и 820 нм. Для всех приведенных значений r_0 и Δr_1 $\sigma_{abs} > \sigma_{sca}$ практически во всем интервале длин волн 250–2500 нм. Следует отметить резкое падение σ_{sca} в интервале длин волн 700–2500 нм с ростом λ .

На рис. 1 представлены также сечения поглощения σ_{abs} , рассеяния σ_{sca} и ослабления σ_{ext} излучения однородными окисными наночастицами TiO_2 как функции λ . Сечение поглощения σ_{abs} резко падает вплоть до 4–5 порядков величины при увеличении длины волны до ~ 700 нм. Это означает, что наночастицы TiO_2 обладают поглощением, сравнимым с поглощением наночастиц Ti + TiO_2 , только в диапазоне длин волн 250–450 нм, а в диапазоне 500–700 нм значения σ_{abs} резко уменьшаются. При этом в диапазоне длин волн 500–2500 нм, содержащем около 85% энергии солнечного излучения, окисные наночастицы практически не поглощают излучение. В этом диапазоне основную роль в ослаблении излучения играет его рассеяние, при этом $\sigma_{sca} \sim \sigma_{ext}$. В данном диапазоне сечение ослабления излучения окисными наночастицами падает с увеличением λ быстрее по сравнению с аналогичными зависимостями для двухслойных наночастиц Ti + TiO_2 . Эти результаты свидетельствуют о практической невозможности использования окисных наночастиц TiO_2 для эффективного поглощения энергии солнечного излучения в диапазоне 500–2500 нм.

Рисунок 2 представляет спектральные зависимости сечения поглощения σ_{abs} , рассеяния σ_{sca} и ослабления σ_{ext} излучения однородными наноча-

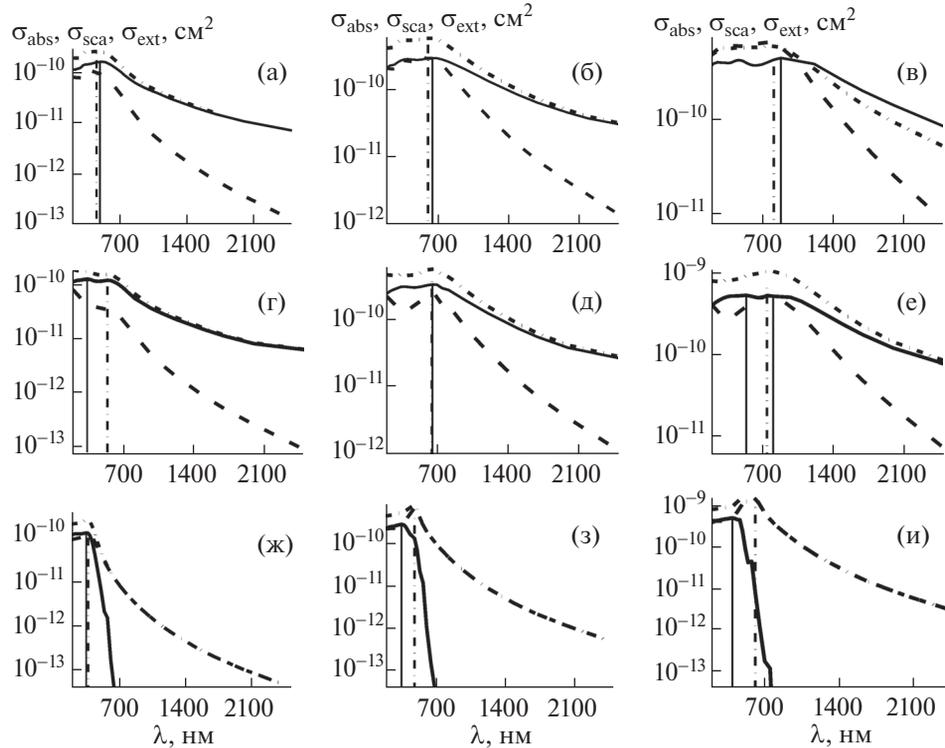


Рис. 1. Спектры поглощения (сплошные линии), рассеяния (штриховые линии) и ослабления (штрихпунктир) излучения однородными наночастицами Ti с $r_0 = 50$ (а), 75 (б), 100 нм (в), двухслойными Ti + TiO₂ с $r_0 = 40$ (г), 65 (д), 90 нм (е) и толщиной оболочки $\Delta r_1 = 10$ нм, однородными TiO₂ с $r_0 = 50$ (ж), 75 (з), 100 нм (и).

стицами Ni и NiO с $r_0 = 50, 75, 100$ нм и двухслойными наночастицами Ni + NiO с $r_0 = 40, 65, 90$ нм и толщиной оболочки $\Delta r = 10$ нм. Отметим резкое – на 2 порядка – падение сечений поглощения, рассеяния и ослабления наночастиц Ni для $r_0 = 50$ нм в интервале $480 < \lambda < 2500$ нм (рис. 2а). Сечения поглощения, рассеяния и ослабления наночастиц Ni с $r_0 = 75$ и 100 нм уменьшаются более чем в 100 раз (рис. 2б и 2в).

Для наночастиц Ni + NiO с $r_0 = 40$ нм сечение поглощения больше, чем сечение рассеяния в спектральном интервале 250–2500 нм. Для наночастиц Ni + NiO с $r_0 = 65$ нм $\sigma_{abs} < \sigma_{sca}$ в спектральном интервале 540–800 нм, а для $r_0 = 90$ нм – в интервалах 250–300 и 490–1550 нм. Это означает возможность использования наночастиц Ni + NiO с $r_0 = 40$ нм для поглощения солнечной радиации в спектральном интервале 200–2500 нм, с $r_0 = 65$ нм – только в спектральных интервалах 290–540 нм и 800–2500 нм и с $r_0 = 90$ нм – только в спектральных интервалах 290–540 нм и 800–2500 нм.

Наличие окисной пленки на наночастице никеля приводит к возрастанию значений сечения поглощения σ_{abs} в интервале 250–340 нм почти в 2 раза, а также возникновению осцилляций значений σ_{abs} с ростом λ , что особенно проявляется

при $r_0 = 90$ нм. Отметим также рост значений σ_{sca} по сравнению со значениями сечения σ_{abs} с ростом r_0 . Это приводит к превышению значений σ_{sca} над σ_{abs} в значительных спектральных интервалах, например при $r_0 = 90$ нм в спектральном интервале ~ 490 –1550 нм. С ростом длины волны λ значения всех сечений σ_{abs} , σ_{sca} и σ_{ext} резко падают вплоть до нескольких порядков по сравнению со своими максимальными значениями.

Для наночастиц NiO, как и для наночастиц из TiO₂, происходит резкое падение σ_{abs} с увеличением длины волны. При этом $\sigma_{sca} \gg \sigma_{abs}$ и $\sigma_{abs}/\sigma_{sca} \ll 1$ в спектральном диапазоне 400–2500 нм. Наночастицы из NiO не подходят для использования в солнечных коллекторах.

Рисунок 3 представляет спектральные зависимости коэффициентов ослабления излучения водой α_{ext}^W , системами наночастиц α_{ext}^N : однородных Ti, Ni с $r_0 = 75$ нм и двухслойных Ti + TiO₂, Ni + NiO с $r_0 = 65$ нм, $\Delta r = 10$ нм в концентрации $N_0 = 10^9, 10^{10}$ см⁻³, суммарного коэффициента ослабления излучения $\alpha_{ext} = \alpha_{ext}^N + \alpha_{ext}^W$ гетерогенными наножидкостями с системами наночастиц Ti, Ni и Ti + TiO₂, Ni + NiO, а также спектр интенсивности солнечного излучения $I_S(\lambda)$.

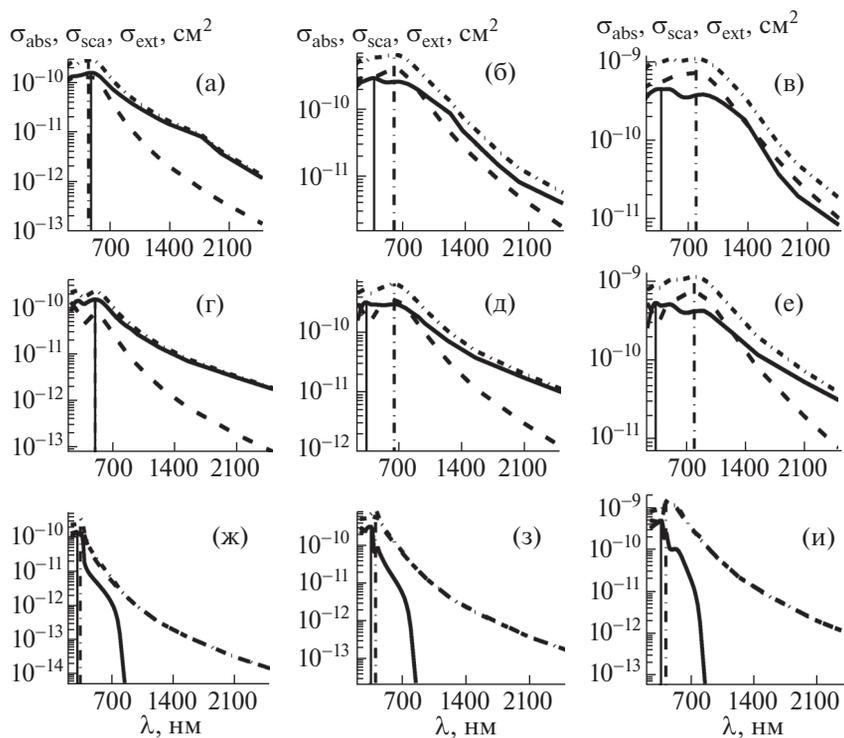


Рис. 2. Спектры поглощения (сплошные линии), рассеяния (штриховые линии) и ослабления (штрихпунктир) излучения однородными наночастицами Ni с $r_0 = 50$ (а), 75 (б), 100 нм (в), двухслойными Ni + NiO с $r_0 = 40$ (г), 65 (д), 90 нм (е) и толщиной оболочки $\Delta r_1 = 10$ нм, однородными NiO с $r_0 = 50$ (ж), 75 (з), 100 нм (и).

В спектральном интервале 200–1000 нм ослабление солнечного излучения водой много меньше, чем ослабление системой наночастиц с концентрациями $N_0 = 10^9, 10^{10} \text{ см}^{-3}$ для всех систем наночастиц Ti, Ti + TiO₂, Ni, Ni + NiO. Естественно, что ослабление излучения системой наночастиц с $N_0 = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ сильнее, чем системой с $N_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$. В результате ослабление излучения в интервале 200–1000 нм определяется доминирующим влиянием системы наночастиц, особенно с $N_0 = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, и $\alpha_{ext} \approx \alpha_{ext}^N$. Для спектральной области $\lambda > 1250$ нм вода становится доминирующим фактором и определяет ослабление излучения, при этом $\alpha_{ext} \approx \alpha_{ext}^W$. Спектральный интервал 1000–1250 нм является переходной зоной от доминирующего влияния систем наночастиц к доминирующему влиянию воды на ослабление излучения наножидкостями. Примерно 18% всей солнечной энергии излучения сосредоточено в спектральном интервале $1250 < \lambda < 2500$ нм. Коэффициент ослабления α_{ext} практически равен α_{ext}^W ($\alpha_{ext} \sim \alpha_{ext}^W$) для систем наночастиц Ti, Ti + TiO₂, Ni, Ni + NiO при $\lambda > 1050$ нм ($N_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$) и $\lambda > 1250$ нм ($N_0 = 10^{10} \text{ см}^{-3}$). Коэффициент ослабления излучения водой равен $\alpha_{ext} \sim$

$\sim \alpha_{ext}^W \sim 10^1 - 10^2 \text{ см}^{-1}$ в интервале длин волн $2500 > \lambda > 1250$ нм [14, 35]. Это означает, что ослабление солнечного излучения с длинами волн в указанном интервале будет реализовано в тонком слое воды с толщиной $\sim 10^{-1} - 10^{-2}$ см.

В спектральном интервале 200–1000 нм для Ti, Ti + TiO₂, Ni, Ni + NiO $\alpha_{ext} = 0.4 - 0.6 \text{ см}^{-1}$ ($N_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$) и $4 - 6 \text{ см}^{-1}$ ($N_0 = 10^{10} \text{ см}^{-3}$), толщина слоя гетерогенной наножидкости с ослаблением излучения в $e = 2.718$ раз составит 3–0.3 см. Это означает, что примерно одинаковое облучение систем наночастиц будет реализовано в слое гетерогенной наножидкости с толщиной 0.3–3 см. Эти результаты позволяют оценить характеристики систем наночастиц с подобранными значениями N_0, r_0 , типами наночастиц Ti + TiO₂, Ni + NiO и толщиной слоя наножидкости.

Трудно найти реальные наночастицы, которые при разумных значениях концентрации не более $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ могут поглощать солнечную энергию в спектральном диапазоне 1250–2500 нм сильнее, чем вода. Коэффициенты поглощения излучения водой достигают в данном спектральном диапазоне значений 10^2 см^{-1} . Следовательно, вода поглощает излучение в слое толщиной ~ 0.1 мм, при этом характерный поперечный раз-

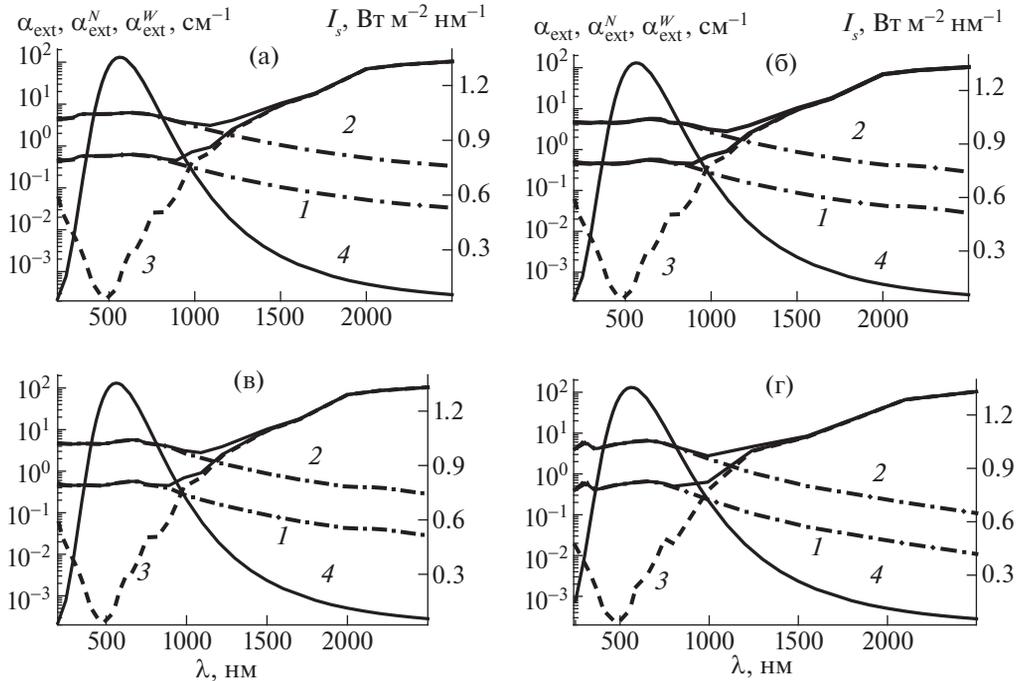


Рис. 3. Спектры ослабления излучения (штрихпунктирные линии 1 и 2) системами однородных наночастиц Ti (а), Ni (в) с $r_0 = 75$ нм и двухслойных наночастиц Ti + TiO₂ (б), Ni + NiO (г) с $r_0 = 65$ нм, $\Delta r = 10$ нм, в концентрации $N_0 = 10^9$ (1), 10^{10} см⁻³ (2), водой (α_{ext}^W , штриховые линии 3), совместно водой и наночастицами (α_{ext} , сплошные линии), а также спектр интенсивности солнечного облучения I_s (4).

мер солнечного коллектора должен составлять $\sim 1-0.1$ см. Это означает невозможность дальнейшего увеличения поглощения излучения в диапазоне 1250–2500 нм наножидкостью с дополнительными абсорберами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе компьютерного моделирования проведено комплексное исследование оптических сечений поглощения σ_{abs} , рассеяния σ_{sca} и ослабления σ_{ext} солнечного излучения в спектральном интервале 200–2500 нм одиночными сферическими однородными металлическими наночастицами Ti, Ni и двухслойными наночастицами с металлическим ядром из Ti, Ni и окисной оболочкой соответственно из TiO₂, NiO и чисто окисными однородными наночастицами из TiO₂, NiO, размещенными в воде. Исследовано влияние значений радиусов ядра и наночастиц в диапазоне 50–100 нм при толщине оболочки $\Delta r_1 = 10$ нм на оптические характеристики наночастиц.

Установлены новые зависимости оптических параметров наночастиц от длины волны излучения с ростом их радиуса в различных средах. Зависимости σ_{abs} , σ_{sca} и σ_{ext} от длины волны λ с из-

менением металла наночастицы и значения r_0 показали, что возрастание значения радиуса частиц ведет к увеличению σ_{abs} , σ_{sca} и σ_{ext} и смещению местоположений максимальных значений σ_{abs} , σ_{sca} и σ_{ext} на оси λ в сторону больших значений длины волны.

Установлено, что наночастицы систем Ti + TiO₂, Ni + NiO для определенных значений r_0 являются хорошими поглотителями, особенно в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном спектральном интервалах и могут быть использованы для целей солнечной тепловой энергетики. Наночастицы TiO, NiO приведенных размеров не подходят для применения в солнечной тепловой наножидкости по своим оптическим характеристикам.

Ослабление излучения системой наночастиц α_{ext}^N и окружающей жидкостью α_{ext}^W являются дополняющими друг друга процессами при взаимодействии солнечной радиации с гетерогенными наножидкостями. В спектральном интервале $1000 > \lambda > 200$ нм выполняется условие $\alpha_{ext}^N > \alpha_{ext}^W$, особенно для $N_0 = 10^9, 10^{10}$ см⁻³ для наночастиц Ti + TiO₂, Ni + NiO. Проведены оценки характерных размеров, концентрации наночастиц, оптических свойств гетерогенных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tang Y., Vlahovic B.* // *Nanoscale Research Lett.* 2013. V. 8. P. 65.
2. *Zhang H., Chen H.-J., Du X., Wen D.* // *Solar Energy.* 2014. V. 100. P. 141.
3. *Paris A., Vaccari A., Lesina A.C., Serra E., Calliari L.* // *Plasmonics.* 2012. V. 7. P. 525.
4. *Villesen T.F., Uhrenfeldt C., Johansen D., Larsen A.N.* // *Nanotechnology.* 2013. V. 24. 275606 (5pp).
5. *Smestad G.P.* // *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2004. V. 82. P. 227.
6. *Hallermann F., Rockstuhl C., Fahr S., Seifert G., Wacke-row S., Graener H., Plessen G., Lederer F.* // *Phys. Stat. Sol.* 2008. V. 205. P. 2844.
7. *Catchpole R., Polman A.* // *Opt. Express.* 2008. V. 16. P. 21793.
8. *Vandenbosch G.A.E., Ma Z.* // *Nano Energy.* 2012. V. 1. P. 494.
9. *Radousky H.B., Liang H.* // *Nanotechnology.* 2012. V. 23. 502001 (35 pp).
10. *Mlinar V.* // *Nanotechnology.* 2013. V. 24. 042001 (11 pp).
11. *Hashemi S.M.H., Choi J.-W., Psaltis D.* // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. V. 16. P. 5137.
12. *Ba-Abbad M., Mohamad A.B., Takriff M.S., Sopian K.* // *Int. J. Electrochem. Sc.* 2012. V. 7. P. 4871.
13. *Otanicar T.P., Phelan P.E., Golden J.S.* // *Solar Energy.* 2009. V. 83. P. 969–977.
14. *Erickson D., Sinton D., Psaltis D.* // *Nature Photonics.* 2011. V. 5. P. 583.
15. *Kameya Y., Hanamura S.* // *Solar Energy.* 2011. V. 85. P. 299.
16. *He Q., Wang S., Zeng S., Zheng Z.* // *Energy Conversion and Management.* 2013. V. 73. P. 150.
17. *Hossain M., Saidur R., Sabri M., Said Z., Hassani S.* // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2015. V. 43. P. 750.
18. *Duan H., Xuan Y.* // *Appl. Energy.* 2014. V. 114. P. 22.
19. *Chen M., He Y., Zhu J., Shuai Y., Jiang B., Huang Y.* // *Solar Energy.* 2015. V. 115. P. 85.
20. *Al-Shamani A.N., Yazdi M.H., Alghoul M.A., Abed A.M., Ruslan M.H., Mat S., Sopian K.* // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2014. V. 38. P. 348.
21. *Said Z., Sajid M.H., Saidur R., Kamalisarvestani M., Rahim N.A.* // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2013. V. 46. P. 74.
22. *Sajid M.H., Said Z., Saidur R., Adikan F.R.M., Sabri M.F.M., Rahim N.A.* // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2014. V. 50. P. 108.
23. *Neumann O., Urban A.S., Day J., Lal S., Halas N.J.* // *ACS Nano.* 2012. V. 7. P. 42.
24. *Fang Z., Zhen Y.-R., Neumann O., Polman A., Garcia de Abajo F.J., Nordlander P., Halas N.J.* // *Nano Lett.* 2013. V. 13. P. 1736.
25. *Polman A.* // *ACS Nano.* 2013. V. 7. P. 15.
26. *Neumann O., Feronti C., Neumann A.D., Dong A., Schell S., Lu B., Sim E., Quinn M., Thompson S., Grady N., Nordlander P., Oden M., Halas N.J.* // *PNAS.* 2013. V. 110. P. 11677.
27. *Bohren C.F., Huffman D.R.* *Absorption and Scattering of Light by Small NPs.* N. Y.: Wiley, 1983; *Борен К., Хафмен Д.* *Поглощение и рассеяние света малыми частицами.* М.: Мир, 1986. 664 с.
28. *Kreibig U., Vollmer M.* *Optical Properties of Metal Clusters.* Heidelberg: Springer, 1995.
29. *Maier S.* *Plasmonics: Fundamentals and Applications,* Heidelberg: Springer, 2007.
30. *Pustovalov V.K., Babenko V.A.* // *Laser Phys. Lett.* 2004. V. 1. P. 516.
31. *Jain P., Huang X., El-Sayed I., El-Sayed M.* // *Plasmonics.* 2007. V. 2. P. 107.
32. *Pelton M., Aizpurua J., Bryant G.* // *Laser Photon. Rev.* 2008. V. 2. P. 136.
33. *Mayergoyz I.* *Plasmon Resonances in Nanoparticles.* Singapore: World Scientific Publishing, 2013.
34. *Amendola V., Bakr O., Stellacci F.* // *Plasmonics.* 2010. V. 5. P. 85.
35. *Pustovalov V., Astafyeva L., Fritzsche W.* // *Science of Advanced Materials.* 2012. V. 4. P. 480.
36. *West P., Ishii S., Naik G., Emani N., Shalaev V., Boltashev A.* // *Laser Photon. Rev.* 2010. V. 4. P. 795.
37. *Blaber M.G., Arnold M.D., Ford M.J.* // *J. Phys. Chem. C.* 2009. V. 113. P. 3041.
38. *Bardhan R., Grady N.K., Ali T., Halas N.J.* // *ACS Nano.* 2010. V. 4. P. 6169.
39. *Sonnefraud Y., Koh A., McComb D., Maier S.* // *Laser Photon. Rev.* 2012. V. 6. P. 277.
40. *Grigoriev V., Bonod N., Wenger J., Stout B.* // *ACS Photonics.* 2015. V. 2. P. 263.
41. ASTM G-173-03-International standard ISO 9845-1, 1992.
42. Refractive index database. Режим доступа <http://refractiveindex.info>
43. *Johnson P., Christy W.* // *Phys. Rev. B.* 1972. V. 6. P. 4370.