

УДК 536.2

Влияние теплового контактного сопротивления на эффективность теплообмена в суспензиях на основе наночастиц с фазовым переходом

Л.Ф. Мещерякова, С.А. Новопашин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: sergeynovopashin@gmail.com

Статья посвящена исследованию нестационарного теплообмена между сферической инкапсулированной наночастицей с фазовым переходом и окружающей средой. В расчете учтено контактное тепловое сопротивление Капицы на границе частицы. Показано, что данное явление может существенно влиять на эффективность теплообмена в наножидкостях.

Ключевые слова: нестационарный теплообмен, контактное тепловое сопротивление, фазоизменяемые материалы.

Введение

Использование фазоизменяемых материалов для хранения тепловой энергии и интенсификации процессов теплообмена [1–5] основано на относительно большой величине энергии фазового перехода. Добавление в базовую среду частиц, которые имеют температуру фазового перехода внутри области изменения рабочих температур, приводит к эффективному возрастанию теплоемкости суспензии. Наиболее часто используются оболочка ядра (core-shell) частицы. Ядро частицы состоит из фазоизменяемого материала, а оболочка выполняет защитные функции. Для уменьшения времени теплообмена между базовой средой и материалом ядра желательно использовать меньший размер частиц. В наибольшей степени это относится к системам теплообмена с вынужденной конвекцией [6, 7]. Наличие оболочки приводит к ограничению потока тепла вследствие дополнительного теплового сопротивления. Кроме того, при уменьшении размеров частиц начинает играть роль величина контактного теплового сопротивления Капицы [8]. Это было показано для теплопроводности суспензий на основе наночастиц теоретически [9] и подтверждено экспериментально [10]. Наличие оболочки также может быть рассмотрено как дополнительное тепловое контактное сопротивление [11]. Суммируя эффекты теплового контактного сопротивления на границах ядро–оболочка и оболочка–внешняя среда, приходим к задаче о процессе теплообмена между средой и сферической частицей при наличии теплового контактного сопротивления на ее границе. Это условие изменяет граничные условия: на границе частица–среда возникает скачок температур, пропорциональный потоку тепла через эту границу. Стационарная задача о теплообмене в этих условиях была решена аналитически [12], а для решения нестационарной задачи требуется применение численных методов.

Математическая модель

Для численного решения нестационарного однородного уравнения теплопроводности применялась явная консервативная разностная схема с порядком точности $O(\tau + h^2)$ [13]. Условие контактного теплового сопротивления Капицы соблюдалось точно, без «размазывания» скачка температур на границе частица–среда.

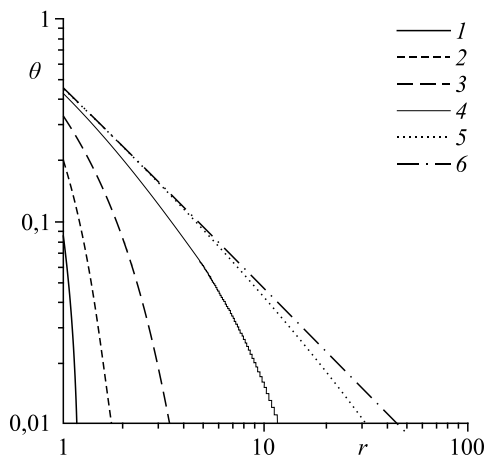
Численно решалась нестационарная задача теплообмена между сферической частицей и окружающей средой. Температура среды на бесконечности принималась равной нулю. Материал частицы имел температуру фазового перехода T_0 (отсчет начинается от температуры среды на бесконечности). При решении использовались следующие обозначения: t — время, R — текущий радиус, a — радиус частицы, T — температура, χ — коэффициент температуропроводности среды, κ — коэффициент теплопроводности среды, G — тепловое контактное сопротивление на границе частица–среда. После проведения обезразмеривания — $\Theta = T/T_0$, $r = R/a$, $\tau = t/(a^2/\chi)$ и $\gamma = \kappa G/a$ — было получено уравнение теплопроводности в сферических координатах:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right).$$

Задача решалась в пространственной области $1 < r < \infty$ с начальным условием $\Theta = 0$. Граничные условия имели вид: температура частицы $\Theta(r^-) = 1$, $\Theta(\infty) = 0$; скачок температуры на контактной границе частица–окружающая среда ($r = 1$) описывается как $\Theta(r^+) - 1 = \gamma \frac{\partial \Theta(r^+)}{\partial r}$. Здесь r^- относится к частице, а r^+ — к окружающей среде. Постоянство температуры внутри частицы соответствует условию фазового перехода. Отметим, что применимость данного подхода ограничена временем, при котором происходит фазовый переход во всем объеме наночастицы. Для анализа теплового потока q введем безразмерную величину $Q = qa/(\kappa T_0)$. Следует подчеркнуть, что решение зависит от единственного параметра: $\gamma = \kappa G/a$.

Результаты

В начальный момент времени тепловой поток через границу раздела определяется величиной контактного сопротивления G и перепадом температуры T_0 : $q = T_0/G$. Для безразмерного теплового потока получим $Q = 1/\gamma$. С течением времени температура на внешней границе раздела будет расти и стремиться к своему предельному значению, соответствующему стационарному условию: $\Theta = 1/(1 + \gamma)$ [12]. При этом поток тепла через границу будет падать до значения $Q = 1/(1 + \gamma)$. На рис. 1 для значения $\gamma = 1,2$ представлены пространственные распределения температуры в различные моменты времени. Данные для времени $\tau = \infty$ взяты из расчета [12]. Видно, что значение температуры на внешней границе частицы растет с увеличением времени, приближаясь к пределу $\Theta = 1/(1 + \gamma) = 0,454$. Распре-



деления температуры в различные моменты времени при $\gamma = 1,2$. $\tau = 0,0118$ (1), $0,118$ (2), $1,18$ (3), $10,7$ (4), $47,6$ (5), ∞ (6).

Рис. 1. Распределение температуры в различные моменты времени при $\gamma = 1,2$. $\tau = 0,0118$ (1), $0,118$ (2), $1,18$ (3), $10,7$ (4), $47,6$ (5), ∞ (6).

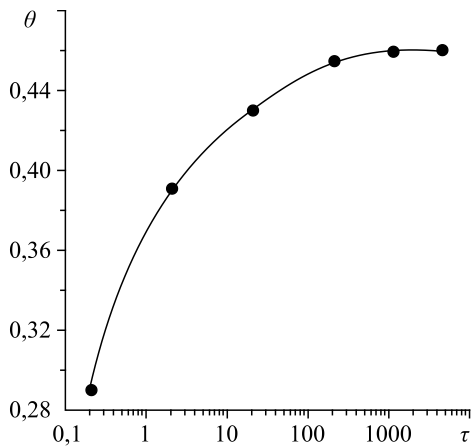


Рис. 2. Зависимость температуры на внешней границе от времени при $\gamma = 1,2$.

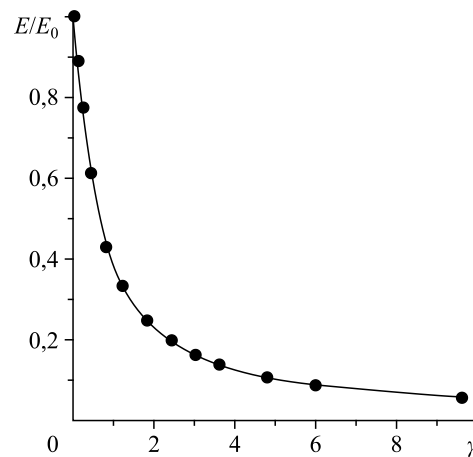


Рис. 3. Зависимость энергии, отданной частицей, от γ к моменту времени $\tau = 2,078$.

деление температуры стремится к зависимости $\Theta(r) = \frac{1}{1+\gamma} \cdot \frac{1}{r}$, соответствующей стационарному решению. Временная зависимость поведения температуры на внешней поверхности границы частицы приведена на рис. 2. Видно, что для достижения температуры, отличающейся на 10 % от предельного значения, требуется время около 10τ .

Контактное тепловое сопротивление оказывает влияние на величину полной энергии, переданной частице за определенный промежуток времени. На рис. 3 представлена зависимость энергии E/E_0 , отданной частицей, от γ к моменту времени $\tau = 2,078$. Энергия нормирована на значение при $\gamma = 0$.

Обсуждение и выводы

В статье представлены результаты расчета нестационарного теплообмена между сферической частицей из материала с фазовым переходом и окружающей средой с учетом контактного теплового сопротивления. Тонкая оболочка при этом может рассматриваться как дополнительное тепловое контактное сопротивление с величиной δ/κ_s , где δ — толщина оболочки, κ_s — коэффициент теплопроводности оболочки [11]. Проведенный расчет позволяет сделать следующие выводы.

1. Для описания нестационарных тепловых процессов в наножидкостях дополнительным безразмерным параметром, характеризующим роль теплового контактного сопротивления, является величина $\gamma = \kappa G/a$.
2. При величине γ порядка единицы теплообмен существенно замедляется (рис. 3), что может оказать заметное влияние на эффективность работы соответствующих теплообменных устройств.

В настоящем исследовании рассматривается постоянная температура частицы, что соответствует условию протекания в ней фазового перехода. Для реальных условий, когда энергия, поступившая в частицу, равна теплоте плавления, расчеты будут некорректными (граничные условия, использованные в работе, будут нарушены). Этот факт нужно учитывать при проектировании устройств.

Список литературы

1. **Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H.** Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications // *Applied Thermal Engng.* 2003. Vol. 23. P. 251–283.
2. **Pasupathy A., Velraj R., Seeniraj R.V.** Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2008. Vol. 12, No. 1. P. 39–64.
3. **Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D.** Review on thermal energy storage with phase change materials and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2009. Vol. 13, No. 1. P. 318–345.
4. **Zhao C.Y., Zhang G.H.** Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): fabrication, characterization and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2011. Vol. 15, No. 8. P. 3813–3832.
5. **Waqas A., Ud Din Z.** Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings — a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2013. Vol. 18(C). P. 607–625.
6. **Wu W., Bostanci H., Chow L.C., Hong Y., Ding S.J., Su M., Kizito J.P.** Jet impingement heat transfer using air-laden nanoparticles with encapsulated phase change materials // *ASME J. Heat Transfer.* 2013. Vol. 135, No. 5. P. 052202-1–052202-8.
7. **Scott D.A., Lampureux A., Baliga B.R.** Modeling and simulations of laminar mixed convection in a vertical pipe conveying slurries of a microencapsulated phase-change material in distilled water // *ASME J. Heat Transfer.* 2013. Vol. 135, No. 1. P. 011013-1–011013-13.
8. **Капица П.Л.** Исследование механизма теплопередачи в гелии-II // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* 1941. Т. 11, № 1. С. 1–31.
9. **Cahill D.G., Ford W.K., Goodson K.E., Mahan G.D., Majumdar A., Maris H.J., Merlin R., Phillpot S.R.** Nanoscale thermal transport // *J. of Applied Physics.* 2003. Vol. 93, No. 2. P. 793–818.
10. **Serebryakova M.A., Zaikovskii A.V., Sakhapov S.Z., Smovzh D.V., Sukhinin G.I., Novopashin S.A.** Thermal conductivity of nanofluids based on hollow γ -Al₂O₃ nanoparticles, and the influence of interfacial thermal resistance // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer.* 2017. Vol. 108, Part B. P. 1314–1319.
11. **Sukhinin G.I., Serebryakova M.A., Novopashin S.A.** Thermal conductivity of suspensions based on core-shell particles // *ASME J. Heat Transfer.* 2016. Vol. 138, No. 6. P. 064501-1–064501-4.
12. **Новопашин С.А., Серебрякова М.А., Сухинин Г.И.** Влияние температурного скачка Капицы на тепловые явления в наножидкостях // *Письма в ЖЭТФ.* 2015. Т. 102, вып. 8. С. 582–584.
13. **Самарский А.А.** Введение в численные методы. М.: Наука, 1982. 288 с.

*Статья поступила в редакцию 17 июня 2021 г.,
после доработки — 19 июля 2021 г.,
принята к публикации 30 июля 2021 г.*