

Влияние температурного скачка Капицы на тепловые явления в наножидкостях

С. А. Новопашина¹⁾, М. А. Серебрякова, Г. И. Сухинин

Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 14 августа 2015 г.

Для описания тепловых процессов в наножидкостях получен безразмерный критерий, характеризующий влияние температурного скачка Капицы.

DOI: 10.7868/S0370274X15200072

В экспериментах Капицы [1] по теплопроводности сверхтекучего гелия был обнаружен скачок температуры на границе раздела двух сред. Это явление часто называют контактным тепловым сопротивлением Капицы (Kapitza Interfacial Thermal Resistance, KИТР). В связи с относительно малой величиной КИТР его вклад сказывается для систем, обладающих малым размером или высокой теплопроводностью. До недавнего времени считалось, что при комнатных температурах скачок температуры Капицы можно не учитывать [2]. Однако развитие нанотехнологий инициировало изучение данного явления в широком диапазоне температур и для различных пар твердых материалов [3, 4]. Влияние КИТР на теплопроводность твердых композиционных материалов теоретически исследовано в работе [5]. Величина контактного сопротивления при комнатной температуре может варьироваться в пределах $G = (2 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-7}) \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ [4]. Оценим соответствующий характерный масштаб для меди (теплопроводность $\kappa \approx 400 \text{ Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$): $L = G\kappa \approx 10^{-7} - 10^{-4} \text{ м}$. Исследования величины КИТР на границе раздела жидкость–твердое тело проведено в [6]. В зависимости от того, является ли поверхность тела лиофильной либо лиофобной к данной жидкости, величина КИТР может изменяться от $3 \cdot 10^{-9}$ до $10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$. Теплопроводность жидкостей значительно меньше. Так, для воды теплопроводность $\kappa \approx 0.6 \text{ Вт} / \text{мК}$. Оценка характерных масштабов, при которых необходимо учитывать вклад КИТР, например, для воды дает $L = G\kappa \approx (2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-9}) \text{ м}$. Для суспензий на основе частиц с размером нанометрового диапазона (наножидкостей [7]) с характерным объемным содержанием на уровне 1% характерное расстояние между частицами в 3–5 раз превышает диаметр частицы. Поэтому температурный скачок Капицы может

оказать влияние на протекание тепловых процессов в наножидкостях.

Выделим две тепловые задачи, для которых наличие температурного скачка Капицы может оказаться важным. Во-первых, это влияние КИТР на теплопроводность наножидкостей. К настоящему времени данную задачу можно считать решенной [5]. В обобщающей работе [8] сделан вывод о том, что теплопроводность наножидкостей описывается теорией Максвелла [9]. Отметим, что при анализе экспериментальных данных влияния КИТР не учитывалось. Вторая задача связана с теплообменом между частицей и средой при выделении тепла в наночастицах, например при гипертермии с нагревом магнитных наночастиц переменным магнитным полем [10, 11], либо при фазовом переходе в материале наночастицы, используемом для интенсификации теплообмена [12, 13]. Оценивая характерные времена установления теплового равновесия ($\tau = L^2/\chi$, где χ – температуропроводность материалов) в медной наночастице для $L = 10 \text{ нм}$ и в воде для $L = 100 \text{ нм}$, получим 10^{-12} и 10^{-7} с соответственно. Для макроскопических процессов, связанных с процессом теплопереноса, эти времена малы, что позволяет использовать для оценки влияния КИТР на процесс теплообмена между частицей и окружающей средой стационарное уравнение теплопроводности. Решаем стационарное неоднородное уравнение теплопроводности с источником тепла $Q = \text{const}$ внутри шара радиуса a , находящегося в бесконечной жидкости, с учетом температурного скачка Капицы на границе шара:

$$T_p(a) - T_f(a) = Gq = -G \frac{\partial T_p}{\partial r} \kappa_p = -G \frac{\partial T_f}{\partial r} \kappa_f,$$

$$T_f(\infty) = T_\infty,$$

где G – величина КИТР, T_∞ – температура на бесконечности, индексы “ f ” и “ p ” относятся к жидкости

¹⁾e-mail: sanov@itp.nsc.ru

и частице соответственно. Решение легко получается аналитически:

$$T_p(r) - T_\infty = \frac{1}{6} \frac{Q}{\kappa_p} (a^2 - r^2) + \frac{a^2 Q}{3\kappa_f} \left(1 + \frac{G\kappa_f}{a} \right) \quad (r < a),$$

$$T_f(r) - T_\infty = \frac{1}{r} \frac{a^3 Q}{3\kappa_f} \quad (r > a).$$

В случае, если заданы температура шара и температура на бесконечности, получаем решение

$$T_f(r) - T_\infty = \frac{a}{r} \frac{T_p - T_\infty}{G\kappa_f/a + 1}.$$

При этом реализуется поток тепла

$$q = \frac{a\kappa_f}{r^2} \frac{T_p - T_\infty}{G\kappa_f/a + 1}.$$

Для обоих рассмотренных случаев безразмерной величиной, характеризующей влияние КИТР, является параметр, зависящий от величины контактного сопротивления, радиуса наночастицы и теплопроводности жидкости: $\gamma = \frac{G\kappa_f}{a}$.

Для наглядности на рис. 1 приведены графики влияния параметра γ на температуру частицы при

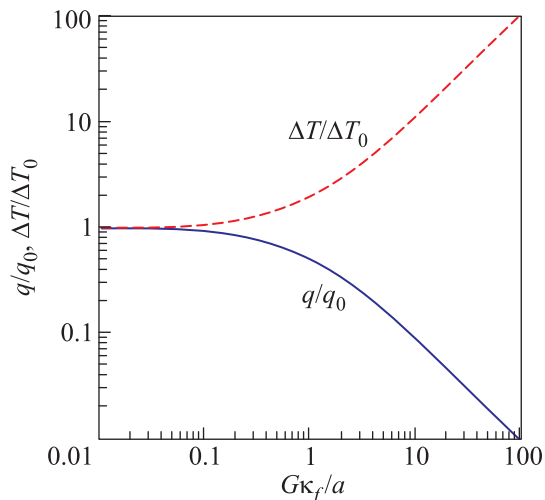


Рис. 1. Влияние температурного скачка Капицы на тепловой поток (при заданных температурах) и на температуры на границе частицы при заданном тепловом потоке

заданном потоке тепла и на поток тепла при заданном перепаде между температурой частицы и температурой на бесконечности. Здесь температура и тепловой поток нормированы на значения при отсутствии температурного скачка Капицы (обозначение на рисунке $\Delta T = T_p(a) - T_\infty$).

Как следует из рисунка, при рассмотрении тепловых процессов в наножидкостях при значении параметра $\gamma > 1$ температурный скачок Капицы необходимо учитывать. Отметим, что наночастицы, используемые как при гипертермии, так и при интенсификации теплообмена за счет теплоты фазового перехода, представляют собой частицы в оболочке (core-shell). В этом случае мы имеем две контактные поверхности и, соответственно, два температурных скачка Капицы. Кроме того, конечная величина оболочки также вносит вклад в дополнительное тепловое сопротивление. Поэтому при решении конкретных задач суммарный вклад может оказаться существенным.

В заключение приведем формулу для относительного увеличения теплопроводности наножидкостей $\frac{\kappa_{nf}}{\kappa_f}$ при объемной концентрации наночастиц φ [5]:

$$\frac{\kappa_{nf}}{\kappa_f} = \frac{2\kappa_f + \kappa_p(1 + 2\gamma) - 2\varphi[\kappa_f + \kappa_p(\gamma - 1)]}{2\kappa_f + \kappa_p(1 + 2\gamma) + \varphi[\kappa_f + \kappa_p(\gamma - 1)]}.$$

Видно, что изменение теплопроводности наножидкостей может быть охарактеризовано параметром $\gamma = \frac{G\kappa_f}{a}$, совпадающим с параметром, полученным в настоящей работе для описания теплообмена между наночастицей и жидкостью. Общий характер этого безразмерного параметра позволяет отнести его к параметрам подобия при описании тепловых процессов в наножидкостях с учетом температурного скачка Капицы.

Авторы благодарны С.К.Немировскому за ряд полезных советов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект # 14-19-01379).

1. П. Л. Капица, ЖЭТФ **11**, 1 (1941).
2. И. М. Халатников, *Теория сверхтекучести*, Наука, М. (1971).
3. D. G. Cahill, W. K. Ford, K. E. Goodson, G. D. Mahan, A. Majumdar, H. J. Maris, R. Merlin, and S. R. Phillpot, *J. Appl. Phys.* **93**, 793 (2003).
4. H.-K. Lyeo and D. G. Cahill, *Phys. Rev. B* **73**, 144301 (2006).
5. C.-W. Nan, R. Birringer, D. R. Clarke, and H. Gleiter, *J. Appl. Phys.* **81**, 6692 (1997).
6. Z. Ge, D. G. Cahill, and P. V. Braun, *PRL* **96**, 186101 (2006).
7. S. U. S. Choi, in: *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, ASME, N.Y. (1995), FED, v. 231 [MD, v. 66, p. 99].
8. J. Buongiorno, D. C. Venerus, N. Prabhat, Th.. McKrell, J. Townsend, R. Christianson, Y. V. Tolmachev,

- P. Keblinski, L.-W. Hu, J. L. Alvarado, I. Ch. Bang, S. W. Bishnoi, M. Bonetti, F. Botz, A. Cecere et al., *J. Appl. Phys.* **106**, 094312 (2009).
9. J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, U.K. (1881).
10. S. Laurent, S. Dutz, U. O. Hafeli, and M. Mahmoudi, *Adv. Coll. Int. Sci.* **166**, 8 (2011).
11. I. Sharifi, H. Shokrollahi, and S. Amiri, *J. of Mag. Mag. Mat.* **324**, 903 (2012).
12. D. A. Scott, A. Lampureux, and B. R. Baliga, *ASME J. Heat Transfer* **135**, 011013 (2013).
13. W. Wu, H. Bostanci, L. C. Chow, Y. Hong, S. J. Ding, M. Su, and J. P. Kizito, *ASME J. Heat Transfer* **135**, 052202 (2013).