

**ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ РЕБЕР РАДИАТОРА НА ПЛАВЛЕНИЕ
ПАРАФИНА С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ**

Н.С. Бондарева

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. М.А. Шеремет

Томский государственный университет, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: r0dniki@mail.ru

**INFLUENCE OF THE RADIATOR FINNING FREQUENCY ON MELTING
OF NANO-ENHANCED PARAFFIN**

N.S. Bondareva

Scientific Supervisor: Dr. M.A. Sheremet

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: r0dniki@mail.ru

Abstract. Heat transfer inside the copper heat sink filled with nano-enhanced paraffin is studied numerically. The hydrodynamic equations were written in dimensionless stream function and vorticity. The energy equation is combined for the melt and solid paraffin by means of the smoothing function φ which determines smooth changes in the latent energy and thermophysical properties of the material during the transition through the interphase. The system of partial differential equations was solved by using the finite difference method. Influence of number of fins and nanoparticles volume fraction on melting regime and natural convection was investigated.

Применение парафинов для хранения и транспортировки энергии широко распространено в энергетических отраслях. При этом в сфере электронной техники материалы с изменяемым фазовым состоянием применяют для охлаждения приборов. Основной целью добавления наночастиц в материал является интенсификация теплопереноса за счет повышения теплопроводности. Уменьшение размеров частиц без снижения объемной доли приводит к увеличению площади соприкосновения частиц с материалом, а значит к усилению теплопроводности [1–4].

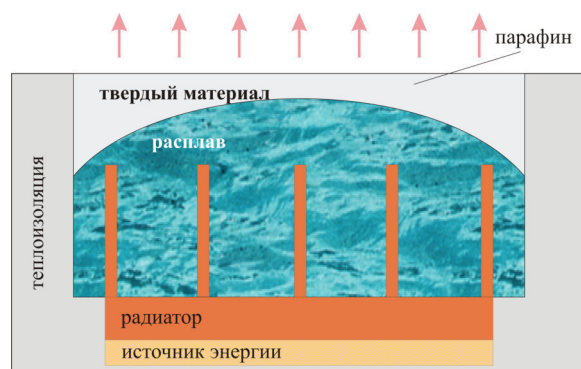


Рис 1. Рассматриваемая область решения

Работа посвящена численному анализу процессов теплопереноса в системе с металлическим профилем, содержащей парафин, усиленный наночастицами Al_2O_3 , и источник постоянной мощности

(рис. 1). В начальный момент времени температура системы совпадала с температурой окружающей среды, которая ниже температуры плавления материала. Рассматривалось влияние частоты расположения ребер на процесс плавления парафина с разными концентрациями наночастиц оксида алюминия. Расплав считался теплопроводной ньютоновской жидкостью, а течение – ламинарным. Уравнения гидродинамики и теплопереноса в переменных «скорость – давление – температура» имеют следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nm}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_{nm}}{\rho_{nm}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nm}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_{nm}}{\rho_{nm}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho\beta)_{nm} g (T - T_m),$$

$$\text{В расплаве уравнение конвективного теплопереноса} - \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = \lambda_{nm} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

$$\text{в твердом парафине уравнение теплопроводности} - \frac{\partial h}{\partial t} = (\lambda_s)_{nm} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right).$$

Внутри профиля и источника энергии решались уравнения теплопроводности с учетом термических свойств материалов этих элементов.

Теплофизические свойства наноматериала определялись из следующих соотношений [2]:

$$(\rho\beta)_{nm} = (1-\Phi)(\rho\beta)_m + \Phi(\rho\beta)_{np}, (\rho c)_{nm} = (1-\Phi)(\rho c)_m + \Phi(\rho c)_{np}, \rho_{nm} = (1-\Phi)\rho_m + \Phi\rho_{np},$$

$$c_{nm} = (\rho c)_{nm} / \rho_{nm}, L_{nm} = (1-\Phi)\rho_l L_l / \rho_{nm}, \mu_{nm} = 0.983e^{12.959\Phi} \mu_m.$$

Теплопроводность определялась из соотношения [3]:

$$\lambda_{nm} = \frac{\lambda_{np} + 2\lambda_m - 2(\lambda_m - \lambda_{np})\Phi}{\lambda_{np} + 2\lambda_m + (\lambda_m - \lambda_{np})\Phi} \lambda_m + 5 \cdot 10^4 \beta_\lambda \Phi \rho_m c_m \sqrt{\frac{\kappa T_l}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \Phi),$$

где $\beta_\lambda = 8,4407(100\Phi)^{-1,07304}$, $\kappa = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ – постоянная Больцмана,

$f(T, \Phi) = (2.817 \cdot 10^{-2} \Phi + 3.917 \cdot 10^{-3}) T_l / T_0 + (-3.0669 \cdot 10^{-2} \Phi - 3.91123 \cdot 10^{-3})$ – для расплава,

$T_0 = 273^\circ \text{K}$, $T_l = 320^\circ \text{K}$, для твердого парафина $f(T, \Phi) = 0$.

В математической постановке приняты следующие обозначения: x, y – декартовы координаты; t – время; g – ускорение свободного падения; μ – динамический коэффициент вязкости; β – коэффициент температурного расширения расплава; ρ – плотность; u, v – горизонтальная и вертикальная компоненты вектора скорости; p – давление; T – температура; T_m – температура плавления; h – энтальпия, λ – коэффициент теплопроводности, c – теплоемкость, Φ – объемная доля наночастиц; а также индексы: s – твердый парафин, l – расплав, m – парафин, np – наночастицы, nm – парафин с наночастицами.

На всех границах, включая границу фазового перехода $\bar{v} = 0$, температура окружающей среды была постоянна $T = T_c$, на остальных границах ставилось условие теплоизоляции $\partial T / \partial \bar{n} = 0$.

Дифференциальные уравнения в частных производных были решены с использованием метода конечных разностей на равномерной прямоугольной сетке 480×200 [5, 6]. Разностное уравнение Пуассона для

функции тока было решено методом последовательной верхней релаксации. Уравнение энергии и уравнение дисперсии завихренности решались с использованием локально-одномерной схемы Самарского.

В результате вычислений были получены распределения таких параметров, как скорость и температура на различных этапах процесса плавления. Рассмотрены случаи с различной частотой расположения ребер и объемной доли наночастиц. Основное внимание уделялось влиянию варьируемых параметров на установление конвективного режима в расплаве и его взаимодействие с межфазной границей.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 17-79-20141).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wen D., Lin G., Vafaei S., Zhang K. Review of nanofluids for heat transfer applications // *Particuology*. – 2009. – Vol. 7. – Pp. 141–150.
2. Dhaidan N.S., Khodadadi J.M., Al-Hattab T.A., Al-Mashat S.M. Experimental and numerical investigation of melting of phase change material/nanoparticle suspensions in a square container subjected to a constant heat flux // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. – Vol. 66. – Pp. 672–683.
3. Vajjha R.S., and Das D.K., Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2009. – Vol. 52. – Pp. 4675–4682.
4. Valan Arasu A., Sasmito A.P., Mujumdar A.S. Numerical performance study of paraffin wax dispersed with alumina in a concentric pipe latent heat storage system // *Thermal science*. – 2013. – Vol. 17, № 2. – Pp. 419–430.
5. Бондарева Н.С., Шеремет М.А. Математическое моделирование режимов плавления в квадратной полости с локальным источником энергии // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. – Т. 23, № 4. – С. 577–590.
6. Bondareva N.S., Sheremet M.A. Flow and heat transfer evolution of PCM due to natural convection melting in a square cavity with a local heater // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2017. – Vol. 134. – Pp. 610–619.