

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ДВУМЕРНЫХ ЛИНИЙ РОСТА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ

И. А. Концевой, В. А. Климович

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Важным аспектом проблемы роста является задача о формировании неоднородной структуры теплового поля на фазовой границе (ФГ). В данной работе рассматривается рост кристалла из однокомпонентного переохлажденного расплава с позиций теории локально-неравновесного теплопереноса. Работа продолжает исследования [1] и имеет цель изучить градиентные свойства теплового поля на линии роста. Рассматриваем ФГ (двумерную плоскую либо осесимметричную), обладающую нестационарной кривизной. Уравнение линии роста постулируем в следующем виде:  $f \equiv x + A(t) - [B(y)]^{p(t)} = 0$ . Эта априорная зависимость основана на экспериментальных сведениях о нестационарных свойствах скорости и кривизны ФГ. Здесь  $t$  – время; в плоском ( $\nu = 0$ ) двухмерном случае  $x$ ,  $y$  – прямоугольные декартовы координаты; в случае осевой симметрии ( $\nu = 1$ ) координата  $x$  соответствует оси симметрии;  $y$  – радиальная координата;  $B = B(y)$  – непрерывная функция;  $B(y) \geq 1$ ,  $\dot{B}(y) \equiv dB/dy \geq 0$  при  $y \geq 0$ , причем  $B(y=0) = 1$ . При  $t = 0$  вершина дендрита находится в начале координат,  $x_j(y=0, t=0) = 0$ . Закон движения вершины дендрита

( $y = 0$ ):  $x_j(t, y = 0) \equiv x_0(t) = 1 - A(t)$ ;  $t \geq 0$ . Двигается ФГ влево:  $dx_0 / dt = -\dot{A}(t) < 0$ .

Работаем с двумерными уравнениями теплопереноса:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} + \frac{v}{y} q_2 = 0; \quad q_1 + \gamma \frac{\partial q_1}{\partial t} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \quad q_2 + \gamma \frac{\partial q_2}{\partial t} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}?$$

где  $T$  – температура;  $q(q_1, q_2)$  – вектор удельного теплового потока;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – объемная теплоемкость;  $\gamma$  – время релаксации теплового потока;  $w^2 = \frac{\lambda}{(\gamma c)}$  – квадрат скорости распространения тепловых возмущений;  $v = 0, 1$ . После

перехода к криволинейным координатным осям (касательная, главная нормаль и би-нормаль к поверхности ФГ) применяем алгоритм, изложенный в [1], и получаем нормальные производные на ФГ  $\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_j, \left(\frac{\partial q_n}{\partial n}\right)_j, \left(\frac{\partial q_s}{\partial n}\right)_j$ . Развернутая запись этих выра-

жений здесь не приводится. Отметим только, что они подсчитываются на основе динамических условий совместности на ФГ кристаллизации, которую мы моделируем поверхностью сильного разрыва теплового поля.

Представлены результаты численного исследования тепловых свойств двумерных линий роста. Анализ выполнен для случаев периодического по времени возмущения скорости и кривизны фазовой границы. Обнаружены существенные количественные различия между режимами колебаний вблизи вершины дендрита и на конечном удалении от нее. Информация, представленная на рис. 1, позволяет судить об интервалах, в которых меняются основные параметры теплового поля на линии роста. Расчеты показали, что характер колебаний не влияет принципиальным образом на свойства данной теплофизической системы. Меняются отдельные фрагменты фазовых портретов, но основные закономерности эволюции линии роста сохраняются.

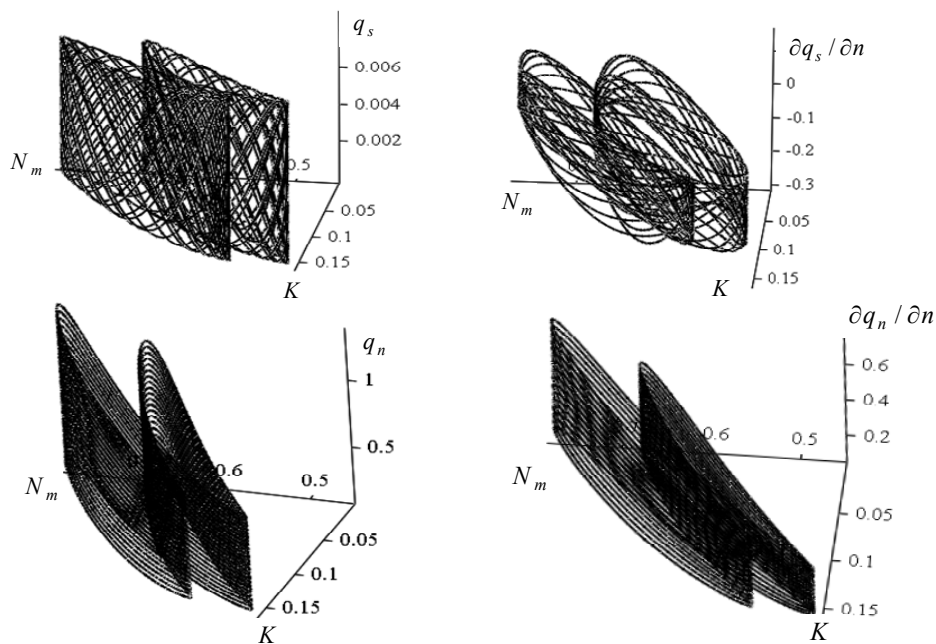


Рис. 1. Тепловые процессы в конечной окрестности вершины дендрита ( $y = 0,01$ )

Данная работа выполнена в рамках госпрограммы «Энергетические системы, процессы и технологии 2.9». Научный руководитель проекта – профессор О. Н. Шабловский.

#### Л и т е р а т у р а

1. Шабловский, О. Н. Тепловая градиентная катастрофа и рост двумерного свободного дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // Прикладная физика. – 2007. – № 3. – С. 29–37.