

**С. В. У с а т и к о в, Е. В. К о ч а р я н** (Краснодар, КубГТУ). **Одномерная и осесимметричная модели автоволновых явлений при вынужденной конвекции кипящего охладителя.**

Рассмотрен теплообмен на фронте тепловой волны смены режимов кипения (автоволны) при вынужденной конвекции кипящего охладителя [1]. В условиях экспериментов [1, 2] нагреватель можно рассматривать в виде осесимметричной трубы (длины  $L \rightarrow \infty$ ) толщиной  $h$  и внутренним радиусом  $R$ , вдоль оси  $z$  которой прокачивается с расходом  $\rho w$  кипящий охладитель. Температура стенки трубы  $\theta = \theta(r, z, \tau)$ , где  $r$  — радиальная,  $z$  — продольная оси нагревателя,  $\tau$  — время, определяется из известного уравнения

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + q_v, \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями. Здесь  $q_v$  — объемная плотность тепловыделения,  $c, \rho, \lambda$  — теплоемкость, плотность и теплопроводность материала трубы.

Кроме температуры стенки  $\theta$ , введем среднюю (по толщине  $\Delta$ ) температуру  $p$  тонкого пристеночного слоя той среды, которая обеспечивает теплоотвод от твердого нагревателя. Этот «пограничный слой» обладает некоторым термическим сопротивлением (по нормали к нагревателю)  $\Delta/\lambda_T$  и средним полем скоростей  $V_z$  вдоль оси  $z$  нагревателя. В случае постоянной и однородной температуры стенки этот слой отводит тепло по известному эмпирическому закону  $q(\theta)$  — кривой кипения. Предполагая малость его тепловой инерции, несжимаемость и пренебрегая выделением тепла трения, а также ролью его термического сопротивления, получим граничное условие для (1):

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R} = -q(\theta|_{r=R}) - W(\theta|_{r=R}) \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{r=R}, \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R+h} = 0. \quad (2)$$

Здесь комплекс  $W(\theta) = V_z c_p \rho_p \Delta$  [Вт/м·К] имеет смысл плотности теплового потока, поглощаемого погранслоем при перепаде в 1 градус на единицу длины,  $c_p, \rho_p$  — теплоемкость и плотность кипящего пристенного слоя.

В случае тонкой трубы ( $h \ll R$ ) модель (1)–(2) сводится к одномерной:

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{u}{s} \left[ q_s - q(\theta) - W(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right], \quad (3)$$

где  $q_s = s/(uq_v)$  — плотность теплового потока нагрузки,  $s, u$  — площадь и периметр сечения трубы. Регрессионная зависимость  $W = ae^{-b\theta^\gamma}$  идентифицировалась по одному из полученных в [2] измерений. Проведена верификация модели. По уравнению (3) рассчитаны зависимости скорости движения фронта температурной волны смены режимов кипения от тепловой нагрузки и массового расхода; построены профили автоволны. Сопоставление результатов с экспериментальными данными [2] показало согласие в пределах 10%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Габараев Б. А., Ковалев С. А., Молочников Ю. С., Соловьев С. Д., Усатилов С. В.* Повторное смачивание и автоволновая смена режимов кипения. — ТВТ, 2001, т. 39, № 2, с. 322–334.
2. *Васильев Н. И., Арестенко Ю. П., Полтавец А. С.* Постановка эксперимента по идентификации и верификации модели автоволновых явлений при вынужденной конвекции кипящего охладителя. — Тепл. проц. в технике, 2009, № 7, с. 288–291.