

УДК 666.1.031

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Р. В. Манаев, Б. А. Верига

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

Эффективность предприятий стекольной промышленности поддерживается освоением производств стекол с новыми потребительскими свойствами и повышением их качества. Создание стекол с необходимыми свойствами требует знания параметров технологического процесса на микроуровне, то есть на уровне конвекционных потоков и общих тепловых процессов, протекающих в стекловаренной печи.

В большинстве случаев процессы тепломассообмена в стекловаренной печи исследованы в значительной мере упрощенно. При этом эти упрощения зачастую бывают очень существенными (одномерность, стационарность, усреднение теплофизических характеристик по большим объемам и прочее).

Известна модель с использованием уравнения Навье-Стокса для неизотермического течения вязкой сплошной среды в поле сил тяжести в приближении Обербека-Буссинеска:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = \frac{1}{\rho} \overline{\text{grad} p} + \bar{g} \beta T + \nu \nabla^2 \bar{V}, \quad (1)$$

к ним добавлено уравнение энергии (тепломассообмена):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{V} \overline{\text{grad} T} = k \nabla^2 T \quad (2)$$

и уравнение неразрывности:

$$\text{div} \bar{V} = 0. \quad (3)$$

Здесь V – поле скоростей течения, T – поле температур, ρ – плотность среды, p – давление, g – вектор ускорения свободного падения, β – коэффициент объемного расширения, ν – кинематическая вязкость, k – температуропроводность, ∇ , ∇^2 – операторы дифференцирования.

В настоящей работе показано, что уравнение неразрывности строго необходимо записать из закона сохранения массы в виде:

$$\text{div}(\rho \bar{V}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0.$$

Так как ρ является функцией координат, получим:

$$\text{div}(\bar{V}) = -\frac{1}{\rho} (\overline{\text{grad} \rho} \cdot \bar{V}),$$

в отличие от (3).

Если использовать полученное уравнение для уравнения Навье-Стокса (1), то оно примет вид:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = \frac{1}{\rho} \overline{\text{grad} p} + \bar{g} \beta T + \nu \nabla^2 \bar{V} + \frac{1}{3} \cdot \frac{\nu}{\rho} \overline{\text{grad}(\rho \cdot \bar{V})}. \quad (4)$$

Также необходимо учесть, что ρ является функцией давления и температуры, которые различны по вертикальной координате Z , как и различна высота уровня стекломассы $h(x, y)$ по длине стекловаренной печи.

В результате формируется замкнутая система уравнений, которая решается численным методом. Установлено, что в отличие от модели, разработанной в Институте проблем точной механики и управления РАН, потоки стекломассы в продольном направлении несимметричны, так как точка максимальной температуры смещена ближе к области загрузки шихты.

Имеется определенная уверенность, что предлагаемая модель правильно описывает процессы в стекловаренной печи и послужит основой для построения автоматизированной системы управления качеством.