

1. Введение

В различных областях техники широко применяются различного рода теплообменники, в которых, в результате интенсификации теплообмена, может быть достигнуто снижение их массогабаритных показателей при заданных значениях теплового потока, гидравлических потерь, расходов и температур теплоносителей; в ряде случаев задачей является снижение температурного уровня поверхности теплообмена при фиксированных режимных и конструктивных характеристиках. Расчётные методы исследования интенсификации теплообмена при турбулентном течении в трубах разработаны ещё недостаточно. Часто они опираются на упрощённые модели сложных физических явлений, при этом допущения приводят к значительной разнице между расчётными и экспериментальными данными. Экспериментальные данные по теплообмену справедливы только для определённого вида течений и типоразмеров турбулизаторов, на которых были проведены опытные исследования. В связи с этим необходима разработка новых, более точных, чем существующие теоретических методов исследования интенсификации теплообмена при турбулентном течении в трубах. В рамках данного исследования под интенсификацией теплообмена понимаются применение искусственных турбулизаторов потока на поверхности, а также шероховатые поверхности [2, 9]. Модель предполагает

двумерную шероховатость. Рассматриваются двумерные поверхности с турбулизаторами, которые применимы и для труб с периодическими диафрагмами.

2. Модель интенсификации теплообмена

Теплообмен при течении в каналах теплоносителей с постоянными теплофизическими свойствами в условиях интенсификации теплообмена моделируется четырёхслойной схемой турбулентного потока [1, 4, 5]. Впервые подобная схема расчёта теплообмена была использована в работах [6-8], а затем существенным образом усложнена в работах [1, 4, 5]. Применим данную модель расчёта теплообмена при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена без применения дополнительных допущений, сделанных как в работах [7-9], так и в работах [3-5]. Теперь следует перейти к непосредственному рассмотрению каждого из подслоя.

1. Вязкий подслоя. Вязкий подслоя располагается в следующей окрестности:

$$R \in \left[1 - \frac{\eta_1}{\text{Re}} \sqrt{\frac{32}{\xi}}; 1 \right], \text{ где } R \text{ — безразмерный радиус трубы (отношение расстояния от оси трубы } r \text{ к радиусу трубы } R_0);$$

$\eta_1 = 5$ — постоянная, характеризующая безразмерную толщину вязкого подслоя [1], ξ — коэффициент сопротивления трению. В области вязкого подслоя принимается, что:

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \beta \frac{\eta^3}{\eta_1^2} = \frac{\beta}{\eta_1^2} \operatorname{Re}^3 (1-R)^3 \left(\frac{\xi}{32} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (1)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = \frac{\xi}{16} \operatorname{Re} (1-R), \quad (2)$$

где μ_T/μ — отношение турбулентной и молекулярной динамических вязкостей;

$w_x/\overline{w_x}$ — отношение аксиальной составляющей скорости к среднерасходной;

$\eta = (1-R)^3 \operatorname{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}}$ — безразмерная

координата; β — постоянная в законе

"третьей степени": $\frac{\mu_T}{\mu} = \frac{\beta}{\eta_1^2} \eta^3$. [1].

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \frac{\eta}{5} - 1 = \frac{\operatorname{Re}}{5} (1-R) \sqrt{\frac{\xi}{32}} - 1; \quad (3)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = 5 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left[1 + \ln \left(\frac{\eta}{5} \right) \right] = 5 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left\{ 1 + \ln \left(\frac{\operatorname{Re}}{5} (1-R) \sqrt{\frac{\xi}{32}} \right) \right\}. \quad (4)$$

3. Вихревое ядро во впадине. Вихревое ядро во впадине располагается в следующей

окрестности: $R \in \left[1 - \frac{h}{R_0}; 1 - \frac{\eta_2}{\operatorname{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}} \right]$, где h — высота турбулизатора. В области

вихревого ядра во впадине принимается:

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \frac{2}{5} \operatorname{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}} \left(1 - \frac{h}{R_0} \right) \frac{h}{R_0}; \quad (5)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left\{ 5.5 + 2.5 \ln \left[\frac{R_0}{h} (1-R) \right] \right\}. \quad (6)$$

2. Промежуточный подслей. Промежуточный подслей располагается в следующей окрестности:

$$R \in \left[1 - \frac{\eta_2}{\operatorname{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}}; 1 - \frac{\eta_1}{\operatorname{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}} \right], \text{ где}$$

$\eta_2 = 30$ [1]. В области промежуточного

подслея принимается, что: