

УДК 532.5, 536.25

DOI: 10.17223/00213411/68/12/18

## Математическое моделирование вынужденной конвекции в осесимметричном канале при локальном нагреве стенки\*

А.А. Шнейдер<sup>1</sup>, М.А. Шеремет<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Данная работа посвящена математическому моделированию вынужденной конвекции в круглой трубе при кольцевом нагреве стенки. Рассмотрены два условия локального нагрева: постоянная температура и постоянный тепловой поток на участке стенки. Решение было получено на основе численного моделирования с использованием метода конечных разностей второго порядка точности. Установлены математические соотношения, отражающие характер зависимости среднего числа Нуссельта на участке нагрева от чисел Рейнольдса ( $50 \leq Re \leq 500$ ) и Прандтля ( $0.7 \leq Pr \leq 100$ ).

**Ключевые слова:** вынужденная конвекция, цилиндрический канал, локальный кольцевой нагрев, среднее число Нуссельта, корреляционные соотношения.

### Введение

Конвективный теплоперенос в каналах играет важную роль в многочисленных технических приложениях, таких как, например, теплообменники, системы охлаждения и трубопроводы. Необходимо различать условия смешанной и вынужденной конвекции, поскольку они существенно влияют на формирование течений и распределение температурных полей [1–3]. Основным показателем интенсивности теплообмена является среднее число Нуссельта ( $\overline{Nu}$ ), которое зависит от геометрических параметров, термодинамических свойств рабочей среды и режима течения [4–6].

В задачах вынужденной конвекции вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрических каналах на интенсивность теплообмена существенно влияют числа Рейнольдса ( $Re$ ) и Прандтля ( $Pr$ ) [7, 8]. Исследования демонстрируют, что снижение температуры на входе и увеличение  $Re$  способствуют усилению теплопередачи [7], а учет переменных теплофизических свойств, например вязкости [8], приводит к более высоким значениям среднего числа Нуссельта по сравнению с моделями с постоянными свойствами.

Еще одним критическим фактором, определяющим характер теплообмена, являются граничные условия на стенке. При постоянном тепловом потоке число Нуссельта, как правило, выше, чем при постоянной температуре, что свидетельствует о более эффективном теплообмене [9]. Исследование развития гидродинамического и теплового пограничных слоев при постоянном тепловом потоке выявило наличие трех различных областей на начальном участке канала [10]. Влияние типа граничного условия значительно зависит от числа Прандтля: при низких  $Pr$  значения  $\overline{Nu}$  могут отличаться до 20% [11].

Особый интерес вызывают асимметричные условия теплового воздействия, в том числе кольцевой нагрев, характерный для тепловых труб. Такие условия существенно изменяют структуру течения, смещая максимум осевой скорости и вызывая циркуляцию, что влияет на интенсивность теплообмена [12–17]. Так, в горизонтальной трубе со сверхкритическим  $CO_2$  было показано, что неравномерный нагрев по окружности или длине может ухудшать теплоотдачу на 13–68% по сравнению с равномерным нагревом [14]. Более того, исследование по выбору оптимального распределения теплового потока демонстрирует, что при восходящем профиле теплового потока средние значения числа Нуссельта оказываются выше, чем при нисходящем профиле [16]. Важно отметить, что при асимметричных тепловых условиях, характерных для многих реальных устройств, классические двумерные осесимметричные модели становятся неприменимы, что требует проведения полноценного 3D-моделирования, учитывающего асимметрию изотерм и реальное распределение теплового потока [17].

Численное моделирование остается основным инструментом анализа таких процессов. Для этого успешно применяется подход на основе преобразованных переменных «функция тока – завихренность скорости», который значительно упрощает математическую модель [18]. Несмотря на это, прямое численное моделирование для каждого конкретного случая сопряжено со значитель-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-49-00221).