

## Численное исследование термогравитационной конвекции в замкнутой области с пористым слоем при различных граничных условиях в межфазной зоне\*

М.С. Астанина<sup>1</sup>, Г.А. Шашкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Исследован численный анализ естественной конвекции в двумерной замкнутой области, где жидкость с переменной вязкостью взаимодействует с пористым слоем и твердым тепловыделяющим элементом, расположенным на нижней стенке. Управляющие уравнения были сформулированы в безразмерной форме с использованием функции тока и завихренности и решены методом конечных разностей на равномерной вычислительной сетке. Изучено распределение гидродинамических и тепловых характеристик, включая изолинии функции тока и температуры, а также ключевые интегральные параметры, такие как среднее число Нуссельта на поверхности источника тепла и средняя температура источника. Особое внимание уделено оценке влияния граничных условий на границе раздела между жидкостью и пористой средой.

**Ключевые слова:** свободная конвекция, пористая вставка, тепловыделяющий элемент, модель локального теплового неравновесия, метод конечных разностей, граничные условия.

### Введение

Знание процессов естественной конвекции внутри пористых сред играет важную роль в таких сферах, как добыча нефти, охлаждение электроники, изучение загрязнения подземных вод и т.д. Работа посвящена актуальной проблеме моделирования естественной конвекции в тепловой системе, включающей в себя жидкость, пористую матрицу и твердый тепловыделяющий элемент. Подобные системы широко востребованы в прикладных задачах, таких как оптимизация тепловых процессов в энергетике (например, повышение эффективности методов теплового воздействия на нефтяные пласты), разработка систем охлаждения микроэлектроники (где пористые структуры используются для интенсивного отвода тепла от компактных элементов) и прогнозирование экологических рисков (распространение загрязнений в грунтовых водах через пористые геологические слои). Особую научную новизну представляет использование модели локального теплового неравновесия (LTNE) для анализа переходных процессов в условиях резких градиентов температуры на границе фаз. В отличие от классического подхода локального теплового равновесия (LTE), учет разделения тепловых полей в твердой и жидкой фазах позволяет более адекватно описывать системы с высококонтрастными свойствами компонентов, что критически важно для инженерных расчетов.

Термогравитационная конвекция в пористых средах является важным аспектом в изучении тепломассообмена, особенно в замкнутых полостях с различными граничными условиями. Численные исследования в этой области позволяют глубже понять влияние параметров пористости, геометрии и тепловых условий на структуру течения и эффективность теплопереноса. В работе [1] исследуется естественная конвекция в наклонной квадратной полости, заполненной пористым материалом, при синусоидальном распределении температуры на боковых стенках. Численное моделирование показало, что наклон полости и форма температурного распределения существенно влияют на структуру течения и теплоперенос. Авторы работы [2] провели численное исследование естественной конвекции в квадратной полости, заполненной наножидкостью, с использованием метода сплайн-функций. Результаты показали, что добавление наночастиц и изменение параметров пористости значительно влияют на теплоперенос и структуру течения. В [3] рассмотрена естественная конвекция в квадратной пористой полости с синусоидальным нагревом на боковых стенках. Используя модель Дарси – Бринкмана – Форхгеймера, было показано, что изменение амплитуды и фазы температурного распределения существенно влияет на интегральные характеристики теплообмена. Авторы работы [4] провели трехмерное численное моделирование естественной конвекции в анизотропной пористой среде с внутренней генерацией тепла. Исследование показало, что анизотропия пористого материала и наличие внутреннего тепловыделения существенно

\* Исследование выполнено в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 24-71-00029).