

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2021 г. по 30.06.2022 г.

по проекту «**Моделирование активных и пассивных систем охлаждения
тепловыделяющих элементов в электронике и энергетике**»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 17-79-20141

Руководитель: д-р физ.-мат. наук Шерemet Михаил Александрович

Была подробно проанализирована возможность использования комбинированной реберной системы (твердое/пористое ребро) для охлаждения периодически тепловыделяющего элемента, расположенного в основании твердой подложки. Разработанный алгоритм был протестирован на множестве сеток и на серии тестовых задачах. В результате проведенного анализа сопряженных режимов естественной конвекции в замкнутой полости с периодически тепловыделяющим источником энергии и реберной структурой получены типичные распределения изолиний функции тока и температуры. Проанализировано влияние количества и структуры ребер на формирование термогидродинамических режимов. Установлена возможность интенсификации теплоотвода от источника энергии при использовании пористых и комбинированных ребер. Показано, что в случае двух ребер, отстоящих от источника энергии, наблюдается более эффективный теплоотвод. Применение полностью пористых или комбинированных ребер характеризует наиболее интенсивный теплоотвод.

При изучении возможности интенсификации теплообмена в полости, заполненной материалом с изменяемым фазовым состоянием, при наличии тепловыделяющего элемента за счет введения как наноразмерных частиц высокотеплопроводного материала, так и металлической пены была разработана эффективная вычислительная модель, основанная на использовании преобразованных переменных “функция тока, завихренность, температура”. В качестве модели для описания поведения наносuspension была использована однофазная модель, предполагающая равномерное распределение наночастиц в объеме. Численное решение определяющих дифференциальных уравнений было получено на основе метода конечных разностей. На основе разработанного алгоритма было проведено численное моделирование процесса плавления лауриновой кислоты с медной пористой вставкой и добавлением наночастиц в широком диапазоне изменения определяющих параметров. Было проанализировано влияние пористости металлической пены и концентрации наночастиц на режим плавления материала и гидродинамику в расплаве при интенсивных и слабых режимах естественной конвекции. В результате проведенного численного исследования показано, что тепловое взаимодействие пористой вставки и наночастиц оказывает сложное воздействие на процессы плавления конвективного теплопереноса.

При моделировании конвективного теплопереноса в частично-пористой кубической полости при наличии тепловыделяющего элемента в условиях локально-

неравновесной тепловой модели для пористой среды определяющие уравнения сформулированы в преобразованных переменных «векторный потенциал – вектор завихренности». В результате было проведено численное моделирование естественно-конвективного теплопереноса внутри замкнутой кубической полости с локальным источником тепловыделения на нижней стенке и пористой вставкой. При этом для описания пористой среды использовалась локально-неравновесная модель теплового взаимодействия. В качестве результатов можно отметить, что описание пористого слоя с помощью локально-неравновесной модели и изменение его свойств иллюстрирует усиление теплоотдачи от теплогенерирующего элемента и интенсификацию теплообмена. В частности, такого эффекта можно добиться изменением высоты пористой вставки и коэффициента межфазного теплообмена (числа Нильда).

Численный анализ естественной конвекции и поверхностного излучения в замкнутой вращающейся кубической полости с локальным тепловыделяющим источником энергии также проведен с использованием преобразованных переменных «векторный потенциал – вектор завихренности». В результате моделирования показано, что при вращении в полости образуются периодические изменения в гидродинамике и теплообмене. Показаны и подробно описаны изменения температуры и скорости жидкости в течение полного оборота полости. Также рассмотрена связь между возникающими течениями и средним числом Нуссельта. Установлено, что увеличение коэффициента излучения приводит к интенсификации теплообмена на поверхности нагреваемого источника.

Подробно исследована возможность интенсификации теплоотвода от источника конечных размеров периодического тепловыделения внутри замкнутой полости при использовании неньютоновской наножидкости в качестве хладагента. Псевдопластичный характер течения жидкости описывается степенным законом Оствальда-де-Вилля. В результате проведенных исследований было проанализировано влияние числа Рэлея, объемной доли наночастиц, относительной частоты колебаний, а также высоты теплопроводной медной подложки на естественно-конвективный теплоперенос псевдопластичной наножидкости в замкнутой квадратной полости с источником переменного тепловыделения. Установлено, что увеличение объемной доли наночастиц приводит к более интенсивному охлаждению нагретого элемента, а рост частоты колебаний позволяет уменьшить амплитуду температурных осцилляций.

Отдельно разработан подход, основанный на использовании решеточных уравнений Больцмана, применительно к решению краевых задач конвективно-радиационного теплопереноса в пространственных объектах. Численное моделирование проводилось как на основе метода конечных разностей (МКР) и преобразованных переменных, так и на основе решёточного метода Больцмана (Р) для определения гидродинамической составляющей и метод конечных разностей был использован для описания теплопереноса в области исследования.

Исследованы особенности теплоотвода в полукоткрытой цилиндрической полости при наличии тепловыделяющей стенки и испарения со свободной

поверхности. В результате была разработана двумерная вычислительная модель в цилиндрических координатах для термокапиллярной конвекции в цилиндрической полости. Математические модели были сформулированы в преобразованных переменных «функция тока – завихренность». В результате численного моделирования установлено, что увеличение числа Марангони приводит к снижению интенсивности теплообмена на свободной границе. Рост плотности теплового потока на боковой поверхности проявляется в интенсификации теплообмена и уменьшении средней температуры внутри полости за счет охлаждения со стороны свободной поверхности.

Математическое моделирование процессов конвективного теплообмена в различных технических системах с использованием пакетов прикладных программ типа Comsol Multiphysics, FlowVision и ANSYS CFD чрезвычайно распространено. Преимуществом данных пакетов является возможность решения широкого спектра весьма сложных задач теплообмена. Однако можно отметить два существенных недостатка коммерческих пакетов. Этими недостатками являются высокая стоимость лицензии и закрытость исходного кода. В этой связи поиск альтернативных способов решения задач тепломассопереноса вынуждает исследователей переходить на свободно-распространяемые программные комплексы с открытым исходным кодом. Одним из таких пакетов является программный комплекс OpenFOAM. В рамках текущего этапа проекта с использованием открытого пакета OpenFOAM проведен численный анализ нестационарных турбулентных режимов конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутой полости с двумя тепловыделяющими элементами. Уравнение переноса излучения в условиях поглощающей и излучающей воздушной среды решено с использованием метода дискретных ординат.