

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2020 г. по 30.06.2021 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 Шеремет Михаил Александрович

В результате реализации этапа настоящего проекта был решен целый ряд задач, имеющих отношение к возможной интенсификации теплоотвода от тепловыделяющих элементов. Так, были разработаны вычислительные модели, описывающие нестационарные режимы переноса массы, импульса и энергии в замкнутой области при наличии локального тепловыделяющего теплопроводного элемента и ребренной радиаторной системы. Разработанные математические модели были сформулированы в преобразованных переменных «функция тока – завихренность». Были проанализированы режимы гидродинамики и теплопереноса как в чистой среде, так и при наличии пористой вставки. При исследовании поведения чистой среды внутри такой системы пассивного охлаждения тепловыделяющего элемента рассматривалось использование твердых и пористых ребер. Для математического описания транспортных механизмов в пористой среде применялось приближение Дарси–Бринкмана и локально-равновесная тепловая модель. В результате решения рассматриваемого класса задач было установлено, что использование в качестве хладагента жидкости с переменной вязкостью может быть полезно с точки зрения интенсификации теплоотвода за счет снижения вязкости такой среды с ростом температуры. Увеличение числа Дарси за счет роста проницаемости пористой вставки также способствует интенсификации теплоотвода от источника энергии. Применение системы охлаждения с медным радиатором для теплогенерирующего элемента имеет хорошие характеристики. Высокая теплопроводность такого радиатора позволяет интенсифицировать теплоотвод от источника энергии. Изменение геометрических характеристик радиатора усиливает этот эффект. Количество ребер также может значительно отражаться на теплопередаче в пассивной системе охлаждения. Сравнение систем охлаждения с твердыми и пористыми ребрами показало возможность интенсификации теплоотвода от источника энергии при использовании пористых ребер. Установлено также, что увеличение высоты ребер проявляется в снижении средней температуры источника энергии.

При математическом моделировании конвективного теплопереноса в частично-пористых системах возникает вопрос использования различных подходов – локально-равновесная и локально-неравновесная тепловые модели. В случае локально-неравновесной тепловой модели возникают вопросы, связанные с формулировкой корректных тепловых граничных условий. Эти вопросы были подробно рассмотрены в рамках решения задачи конвективного теплопереноса в замкнутой вращающейся

дифференциально-обогреваемой полости, заполненной частично пористой средой. На границе раздела сред рассматривались условия равенства тепловых потоков сразу для трех участвующих материалов (чистая жидкость, твердый скелет и жидкость внутри пористого материала с учетом пористости), а также условие, отражающее равенство тепловых потоков со стороны чистой среды и пористого материала (последний включает в себя тепловой поток со стороны твердого скелета и чистой среды внутри пор с учетом пористости). Проведенные исследования показали наличие возможных отклонений для данных граничных условий, что необходимо учитывать при рассмотрении конкретных задач.

При численном исследовании влияния формы реберной структуры на гидродинамику и теплоперенос в системе, содержащей материал с изменяемым фазовым состоянием (лауриновая кислота), с учетом периодического тепловыделения локальным источником энергии было показано, что при небольших мощностях источника энергии $Os = 0.084$ нагрев всей системы происходит в течение длительного периода и поэтому более равномерно. Температура в металлическом профиле незначительно превышает температуру лауриновой кислоты, и в расплаве развиваются слабые конвективные течения. При увеличении мощности источника рост температуры в профиле происходит значительно быстрее, чем в материале с изменяемым фазовым состоянием из-за низкой теплопроводности лауриновой кислоты и высокой теплопроводности меди. Однако из-за большого количества ячеек плавление происходит более равномерно. Вдоль внутренних вертикальных стенок расплав, нагреваясь, поднимается вверх. С удалением межфазной границы от стенок, естественная конвекция расплава становится определяющим механизмом дальнейшего плавления. После полного расплавления материала и отключения источника наиболее прогретый расплав концентрируется в верхней части ячеек, при этом движение расплава со временем останавливается, и кристаллизация материала происходит равномерно вдоль стенок вследствие преобладания механизма теплопроводности. Проанализировано влияние формы реберной структуры радиаторной системы, характеризующейся различным количеством внутренних ячеек в профиле. Установлено, что при высоких тепловых нагрузках $Os = 0.338$ увеличение количества ячеек способствует снижению температуры источника и более быстрому плавлению материала. Несмотря на одинаковый объем материала с изменяемым фазовым состоянием, скорость плавления материала не всегда обеспечивает более низкую температуру источника энергии. Большую роль в эффективности теплового рассеивания играет также гидродинамика в расплаве.

Проведено математическое моделирование нестационарных режимов сложного (конвекция, теплопроводность и излучение) теплообмена в замкнутой области при наличии импульсно-тепловыделяющего элемента в условиях турбулентного приближения. Внешняя температура одной из стенок изменялась по временному закону. Исследована эволюция термогидродинамических структур во времени. В начальный момент движение воздуха внутри области решения характеризуется образованием двух вихрей вблизи угловых зон источника тепловыделения. Их появление связано с перепадом между начальной температурой внутри области и

температурой источника. Наличие восходящего течения нагретого воздуха в центральной части полости характеризуется появлением двух тепловых факелов вблизи угловых зон источника тепловыделения. Дальнейшее увеличение времени приводит к росту размера вихрей и к их разделению на две отдельные вихревые структуры. Две вихревые структуры, определяющие движение по часовой и против часовой стрелки, формируются внутри полости при $\tau = 50$. В этот же момент заметно формирование единой термической структуры за счет слияния тепловых факелов. Дальнейшее более интенсивное проникновение низкотемпературной тепловой волны, движущейся со стороны окружающей среды, приводит к смещению теплового факела к правой вертикальной границе. Увеличение степени черноты внутренних поверхностей ограждающих стенок снижает интенсивность конвективного течения, при этом наблюдается уменьшение температуры внутри источника тепловыделения.

При численном исследовании естественной конвекции и поверхностного излучения в замкнутой вращающейся полости при наличии источника энергии периодического тепловыделения и твердой подложки, моделирующей условия теплового мостика для теплоотвода, было установлено, что увеличение угловой скорости вращения приводит к уменьшению интенсивности течения жидкости и конвективного теплообмена, увеличение толщины подложки проявляется в уменьшении средней температуры источника, а высокие значения толщины подложки позволяют значительно снизить среднюю температуру источника при слабом вращении. Следует отметить, что в рассматриваемой постановке период нагрева значительно больше периода вращения и включает в себя целое число полных оборотов полости.

При изучении конвективного теплопереноса в системах, содержащих псевдопластические жидкости, возникают вычислительные сложности, обусловленные появлением бесконечного уровня эффективной вязкости при стремлении к нулю интенсивности скоростей деформаций. Для решения этой проблемы используют различные модели регуляризации за счет введения малого добавочного слагаемого в выражение для эффективной вязкости. Поэтому в рамках настоящего проекта был проведен выбор оптимальной модели регуляризации для исследования свободноконвективного теплопереноса псевдопластической жидкости в замкнутой дифференциально-обогреваемой полости. Исследовались три модели: простейшая алгебраическая модель, модель Берковера и Инглемана и модель Папанастасиоу. В результате показано, что модель Берковера и Инглемана с параметром регуляризации $\varepsilon = 0.01$ является наиболее подходящей в связи с отсутствием существенных отличий с остальными моделями и обладающей приемлемыми устойчивостью и сходимостью. Используя эту модель, было проведено математическое моделирование естественной конвекции степенной наножидкости, заполняющей квадратную замкнутую полость, при наличии локального источника энергии, моделируемого участком нижней стенки с постоянной температурой или постоянным тепловым потоком. Полость была заполнена жидкостью, состоящей из наночастиц оксида алюминия и смеси воды и 1 % многостенных нанотрубок.

В результате проведенных исследований установлено, что изменение объемной доли наночастиц оксида алюминия не оказывает существенного влияния на теплообмен в полости. Увеличение концентрации наночастиц приводит к небольшому ослаблению конвективного механизма переноса тепла.

При рассмотрении нестационарных режимов естественной конвекции наножидкости с экспериментально-установленными корреляциями для физических параметров среды внутри замкнутой полости при наличии источника периодического тепловыделения, было установлено, что увеличение частоты объемного тепловыделения усиливает теплоперенос в полости, конвективные ядра смещаются ближе к верхней границе области решения. Конвективный факел над источником энергии при этом сужается в основании и расширяется около верхней адиабатической стенки, отражая усиление теплоотвода от источника. Следует также отметить, что рост частоты объемного тепловыделения приводит к уменьшению периода и амплитуды колебаний средней температуры внутри источника энергии.

Отдельно проанализированы возможности решеточных уравнений Больцмана при решении сопряженных задач конвективно-радиационного теплопереноса в областях с тепловыделяющими элементами. Разработан вычислительный код, основанный на гибридной схеме метода конечных разностей и решеточного метода Больцмана. Метод конечных разностей использовался для решения уравнений энергии, а решеточный метод Больцмана применялся для решения уравнений движения. Полученные результаты хорошо согласуются с данными метода конечных разностей.

При численном исследовании особенностей теплоотвода в цилиндрических каналах при наличии периодически тепловыделяющего элемента показано, что увеличение частоты периодического тепловыделения иллюстрирует уменьшение периода колебаний средней температуры внутри источника энергии, при этом экстремальные значения средней температуры остаются без изменений. Повышение частоты периодического тепловыделения проявляется в менее интенсивном прогреве канала вниз по течению, что связано с уменьшением периода тепловыделения.