

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2017 г. по 30.06.2018 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 первого этапа настоящего проекта были разработаны современные математические модели, описывающих нестационарные режимы сложного переноса массы, импульса и энергии в турбулентном приближении в замкнутых 3D областях при наличии источника энергии на основе преобразованных переменных «векторный потенциал – вектор завихренности», а также с использованием физических переменных «скорость – давление». Для построенных математических моделей были адаптированы численные методы, созданы алгоритмы и программы численного решения сформулированных пространственных нестационарных краевых задач. Отдельно проведена верификация построенных математических моделей и разработанных численных алгоритмов на модельных трехмерных и двумерных задачах, а также на известных экспериментальных данных. Проведено численное моделирование основных закономерностей гидродинамики и теплопереноса в сформулированных трехмерных постановках. В частности, показано, что наличие осцилляций на начальном временном этапе в зависимостях средних радиационного и конвективного чисел Нуссельта на изотермической стенке от времени при различных значениях приведенной степени черноты обусловлены существенной нестационарностью процесса, вследствие формирования термогидродинамических структур в полости. Увеличение приведенной степени черноты поверхностей проявляется в интенсификации радиационного теплообмена на границе раздела двух сред. Рост этого параметра от 0.3 до 0.5 приводит к увеличению среднего радиационного числа Нуссельта более чем на 69 %. Представленные графические зависимости также наглядно демонстрируют характерное снижение интенсивности конвективного теплообмена на границе раздела двух сред с увеличением приведенной степени черноты.

Изучение конвективного теплопереноса в замкнутых областях, с учетом влияния теплопроводных ограждающих твердых стенок имеет большое значение для понимания сущности процессов теплопереноса, протекающих в технологических объектах. Как правило, в таких системах, доминирующим механизмом переноса энергии является естественная конвекция, но, как было показано ранее, пренебрежение влиянием теплопроводности может приводить к значительным отклонениям как в интегральных характеристиках, так и в структуре полей скорости и температуры. Следует отметить, что увеличение относительного коэффициента теплопроводности приводит к более интенсивному прогреву рабочей среды в полости, а также ограждающих стенок. Установлено также, что в двумерном случае

нагрев полости происходит более интенсивно по сравнению с трехмерным вариантом. Сравнивая результаты плоской и пространственной постановок можно утверждать, что наличие третьей координаты вносит существенные коррективы в конфигурацию полей температур.

Отдельно исследовано влияние формы локального источника энергии на структуру течения и теплоперенос внутри кубической полости в рамках пассивной системы охлаждения локального источника энергии. Сравнение двумерных результатов и трехмерных данных для среднего сечения кубической полости иллюстрирует смещение ядра конвективных ячеек и увеличение различий в изотермах при изменении угла наклона стороны источника энергии. В то же время, более эффективный теплосъем с поверхности нагревателя может быть осуществлен при высоких значениях числа Рэлея и наличия трапециевидной формы источника с углом наклона боковой стороны равным 71° , в то время как средняя температура внутри полости увеличивается с ростом угла наклона стороны нагревателя.

Проведено математическое моделирование нестационарных режимов теплопереноса в замкнутой полости, заполненной материалом с изменяемым фазовым состоянием, при наличии локального тепловыделяющего элемента в рамках пассивной системы охлаждения. Показано, что увеличение плотности объемного тепловыделения источника энергии приводит к росту количества образующихся на начальном этапе конвективных циркуляционных ячеек. Развитие процесса плавления приводит к объединению сформировавшихся вихрей. Независимо от мощности источника энергии при достижении высокой степени расплавления материала внутри полости гидродинамическая картина теряет свою симметричность, вследствие формирования нестационарного режима, характеризующегося постоянным возникновением и исчезновением новых температурных факелов, а также смещением вихревых структур. Нестационарность процесса также отражается на теплоотдаче, а именно, среднее число Нуссельта возрастает с появлением небольших второстепенных потоков и уменьшается при их диссипации.

Численно проанализирована активная система охлаждения тепловыделяющего элемента в горизонтальном канале с каверной за счет механизмов смешанной конвекции и излучения. Показано, что увеличение коэффициента излучения внутренних поверхностей приводит к снижению средней температуры источника энергии и, как результат, проявляется в уменьшении средней температуры внутри анализируемого объекта. Среднее конвективное число Нуссельта уменьшается с ростом приведенной степени черноты ограждающих стенок, а среднее радиационное число Нуссельта при этом растет. Увеличение расхода хладагента на входе в канал проявляется в падении средней температуры источника энергии и повышении средних чисел Нуссельта. В итоге установлено, что за счет повышения приведенной степени черноты ограждающих стенок можно существенно снизить температуру тепловыделяющего элемента.

Проведено моделирование влияния вращения двумерной полости на интенсивность теплоотдачи от источника энергии, расположенного внутри полости

(механизмы естественной конвекции, теплового излучения и теплопроводности). В результате установлено, что повышение коэффициента излучения поверхностей подавляет конвективный теплообмен, в то время как общая интенсивность теплообмена возрастает из-за усиления радиационной составляющей. В тоже время с повышением коэффициента излучения средняя температура внутри источника значительно уменьшается. Рост числа Тейлора усиливает конвективное течение и теплообмен при умеренных значениях, но его дальнейшее увеличение ведет к затуханию конвективного потока и снижению теплопередачи. Более того, влияние числа Тейлора усиливается при низких значениях коэффициента излучения. Так же с ростом числа Тейлора увеличивается средняя температура в источнике. Увеличение числа Остроградского приводит к росту числа оборотов полости, необходимых для установления периодичности в гидродинамике и теплопередаче. Все рассматриваемые параметры растут с увеличением числа Остроградского. В то же время, влияние числа Тейлора усиливается при высоких значениях числа Остроградского.

Исследовано влияние пористых вставок на интенсивность теплоотвода от тепловыделяющих элементов на основе разработанных моделей в рамках активной и пассивной систем охлаждения в двумерных областях. Показано, что рост числа Дарси усиливает конвективный поток и теплообмен внутри полости, что приводит к охлаждению тепловыделяющего элемента. Этот эффект усиливается при высоких значениях параметра изменения вязкости. Повышение параметра изменения вязкости усиливает конвективный поток в полости из-за уменьшения вязкости жидкости. В то же время средняя температура источника энергии уменьшается с ростом этого параметра. Увеличение числа Остроградского приводит к существенному нагреву элемента, где средняя температура тепловыделяющего элемента, интенсивность течения среды и среднее число Нуссельта повышаются. Толщина пористого слоя играет существенную роль, поскольку этот параметр позволяет оптимизировать пассивную систему охлаждения из-за усиления охлаждающего эффекта от холодных вертикальных стенок. Поэтому толщина пористой вставки и параметр изменения вязкости являются очень хорошими характеристиками управления для рассматриваемой системы охлаждения.

В результате проведенных исследований опубликованы 7 статей в ведущих российских и международных научных рецензируемых журналах, в том числе 4 статьи в изданиях, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science) или «Скопус» (Scopus), а также 3 статьи в русскоязычных изданиях, учитываемых РИНЦ. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Полученные фундаментальные результаты были представлены на международных и всероссийских конференциях.