

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2018 г. по 30.06.2019 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 второго этапа настоящего проекта были разработаны современные математические модели, описывающие нестационарные режимы переноса массы, импульса и энергии в турбулентном приближении в замкнутых областях при наличии локального тепловыделяющего элемента с учетом более общих моделей радиационного теплопереноса применительно к исследованию транспортных процессов в поглощающих, излучающих и рассеивающих средах. Разработанные математические модели были сформулированы в преобразованных переменных «функция тока – завихренность». Для математического описания механизма переноса излучения использовались три приближения – P-1 приближение метода сферических гармоник, модель Росселанда и модель поверхностного теплового излучения. Для реализации построенных математических моделей были адаптированы численные методы, созданы алгоритмы и программы численного решения сформулированных нестационарных краевых задач. Отдельно проведена верификация построенных математических моделей и разработанных численных алгоритмов на модельных задачах, а также на известных экспериментальных данных. Проведено численное моделирование основных закономерностей гидродинамики и теплопереноса в сформулированных постановках. Отдельно были рассмотрены возможности открытой интегрируемой платформы OpenFOAM при решении задач конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутых областях с тепловыделяющими элементами. В результате решения рассматриваемого класса задач было установлено, что использование (P-1)-приближения приводит к снижению средней температуры в рассматриваемом объекте по сравнению с результатами, полученными на основе приближения Росселанда, при умеренных значениях числа Рэлея. Определены масштабы нелинейного влияния внешней среды, вследствие конвективно-радиационного теплообмена на одной из стенок, ограничивающих газовую полость. Установлено, что увеличение числа Рэлея приводит к росту среднего числа Нуссельта на характерных границах раздела. В случае модели поверхностного излучения для тепловыделяющего источника было показано, что рост приведенной степени черноты ограждающих стенок от 0.3 до 0.9 при постоянных относительном коэффициенте теплопроводности и числе Рэлея приводит к существенному увеличению значений радиационного числа Нуссельта более чем в 2.8 раза. В то же время рост значений степени черноты поверхностей приводит к уменьшению значений среднего конвективного числа Нуссельта (значение этой характеристики снижается на 8.1% при изменении степени черноты от 0.3 до 0.9).

При проектировании электронных устройств основная сложность заключается в том, чтобы правильно спрогнозировать распределение температуры внутри тепловыделяющего элемента. В настоящее время имеется тенденция к миниатюризации отдельных тепловыделяющих элементов, что, как правило, приводит к повышению рабочих температур и, соответственно, влияет на надежность оборудования. Число Остроградского (Os) характеризует интенсивность тепловыделения от источника. При проведении исследований было показано, что радиационное число Нуссельта увеличивается в 2.01 раза при изменении Os от 0.5 до 2. Стоит отметить, что увеличение числа Остроградского повышает среднюю температуру внутри тепловыделяющего элемента на 26%.

При рассмотрении нестационарной сопряженной задачи плавления материала с фазовым переходом внутри замкнутой системы, содержащей радиатор и источник объемного тепловыделения, было установлено, что при большом количестве ребер жидкость между ребрами практически не циркулирует, плавление в этих областях осуществляется за счет теплопроводности. Большая площадь постепенно нагреваемой поверхности соответствует большому тепловому потоку и более высокой скорости плавления на начальных этапах нагрева. Однако, как только линия фазового перехода перемещается выше границ радиатора, интенсивность теплоотдачи резко падает. Поэтому среднее число Нуссельта для случаев $n = 8$ и $n = 10$ (n – количество ребер) имеет резкий спад еще до момента установления конвективного режима. Как следствие, этот момент сопровождается резким спадом скорости плавления материала. Снижение интенсивности плавления выражается в резком перегибе графиков объемной доли расплава. Несмотря на высокую скорость плавления в начале процесса для случаев $n \geq 8$, при достижении определенного объема расплава, скорость плавления резко снижается и время, затрачиваемое на полное расплавление парафина, для случаев $n = 8$ и $n = 10$ практически совпадает со случаем $n = 5$. При появлении и развитии естественно-конвективных течений, тепловой факел от радиатора при $n = 5$ становится значительно выше, чем в случаях с большим количеством ребер. Поэтому в условиях, когда температура источника постоянно повышается, целесообразно использовать радиаторы с оребрением, способствующим развитию конвективного режима теплопереноса. Таким образом, эффективность системы может быть повышена за счет добавления ребер, но ограничена вязкостью парафина и в рассматриваемых условиях наиболее оптимальный рост теплоотдачи наблюдается при $n = 5$. Установлено также, что при наличии удлиненных ребер их толщина играет важную роль. Более широкое пространство между ребрами способствует появлению дополнительных восходящих потоков и интенсификации теплообмена между профилем и парафином. Увеличение ширины ребер способствует формированию замкнутых циркуляционных потоков между ребрами и значительному снижению скорости теплообмена. Увеличение зазора между краями за счет сужения ребер приводит к изменению структуры потока и увеличению градиента температуры на поверхности профиля. Несмотря на разницу в объемной доле материала с фазовым переходом в системе при уменьшении ширины ребер, время, затрачиваемое на плавление всего парафина, изменяется в среднем на 3%, но общий вес системы значительно уменьшается.

Отдельно проанализированы возможности решеточного метода Больцмана применительно к решению задач естественной конвекции в замкнутых областях при наличии локальных источников энергии. Продемонстрирован хороший потенциал указанного метода. При решении задачи естественной конвекции наножидкости в Г-образном канале при наличии локального изотермического источника указанным методом установлено, что увеличение числа Рэлея и толщины источника энергии, а также уменьшение геометрического параметра полости приводят к интенсификации теплообмена. Показано, что расположение источника энергии на вертикальной боковой стенке способствует более высоким значениям чисел Нуссельта.

Проведено математическое моделирование нестационарных режимов естественной и смешанной конвекции неньютоновской степенной жидкости в замкнутой полости и в открытом горизонтальном канале с локальным тепловыделяющим источником в рамках пассивной и активной системы охлаждения. Показано, что с ростом индекса степенного закона (n) наблюдается подавление конвективного течения, при этом структура течения не терпит существенных изменений, как и форма рециркуляционных зон. Распределение изотерм также не подвержено значительным переменам. С увеличением параметра n наблюдается менее интенсивное охлаждение области решения, и, соответственно, источника энергии. Полученные распределения отражают возможность интенсификации теплосъема от источника энергии и уменьшения его средней температуры в случае использования псевдопластической жидкости.

Численно проанализированы особенности гидродинамики и теплопереноса в случае естественной конвекции жидкости с переменной вязкостью в замкнутой полости с локальным тепловыделяющим источником при наличии пористой вставки. Показано, что увеличение пористости материала приводит к лучшему отводу тепла от источника энергии из-за усиления циркуляции жидкости внутри пористого слоя. Установлено также, что рост параметра изменения вязкости характеризует уменьшение вязкости жидкости с ростом температуры. Такое поведение вязкости приводит к лучшему охлаждению источника энергии и пористой вставки из-за увеличения скорости циркуляции. Отмечается, что независимо от значений параметра изменения вязкости значение среднего числа Нуссельта увеличивается с ростом пористости вставки, в то время как средняя температура источника и интенсивность циркуляции жидкости изменяются не монотонно с увеличением пористости. В случае жидкости с постоянной вязкостью интенсивность циркуляции среды уменьшается с ростом пористости, а в случае жидкости с переменной вязкостью изменение происходит скачкообразно. Отмеченное влияние параметра изменения вязкости и пористости вставки на интегральные характеристики свидетельствует о возможности подбора оптимальных значений определяющих параметров так, чтобы система охлаждения тепловыделяющего источника работала эффективно. Таким образом, использование рабочей жидкости с переменной вязкостью и изменение свойств пористой вставки может улучшить характеристики пассивной системы охлаждения.

Проведено математическое моделирование влияния вращения квадратной полости на интенсивность теплоотдачи от изотермического источника энергии,

расположенного внутри полости при наличии пористой вставки. В результате проведенных исследований установлено, что уменьшение числа Дарси для высоких чисел Рэлея отражает повышение теплопередачи, в то время как интенсивность циркуляции уменьшается. В свою очередь повышение числа Тейлора иллюстрирует ослабление теплообмена и интенсивности течения жидкости. Уменьшение числа Дарси приводит к подавлению конвективного течения, что более заметно при большой толщине пористого слоя. Увеличение толщины пористого слоя отражает снижение скорости теплообмена.

Исследовано влияние трех моделей для описания транспортных процессов в пористых средах для сопряженной задачи естественной конвекции в пористой кубической полости с теплопроводными стенками конечной толщины и изотермическим источником энергии. В результате установлено, что независимо от значения числа Дарси внутри пористого объема формируется тороидальный вихрь, что характеризует появление восходящих течений в центральной части полости и нисходящих течений около боковых стенок. Уменьшение числа Дарси в диапазоне от $1e-3$ до $1e-5$ приводит к ослаблению конвективного течения внутри объема, при этом ядро тороидального вихря смещается к источнику энергии. Последнее отражает также снижение интенсивности циркуляции среды в средних сечениях полости. Изотермы иллюстрируют доминирование механизма теплопроводности при уменьшении числа Дарси. В результате сравнения полученных изолиний функции тока и изотерм для различных пористых моделей можно отметить, что при $Ra_m < 10$ теплообмен и гидродинамика внутри пористого объема могут быть описаны на основе линейного закона Дарси, но при этом присутствуют значительные изменения в изотермах внутри твердых стенок. Необходимо отметить, что дополнительное сопротивление среды, связанное с инерционными эффектами, учтенными в модели Дарси–Бринкмана–Форхгеймера, оказывает влияние на гидродинамику и теплоперенос в случае высоких значений проницаемости среды. Использование линейного закона Дарси при $Ra_m > 10$ приводит к менее интенсивному охлаждению области исследования по сравнению с нелинейными моделями вследствие пренебрежения инерционными эффектами.