

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2019 г. по 30.06.2020 г.

по проекту «**Математическое моделирование сложного теплообмена в
строительных сооружениях**»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 19-79-00296

Руководитель: канд. физ.-мат. наук Мирошниченко Игорь Валерьевич

В рамках реализации первого этапа настоящего проекта были разработаны современные математические модели, описывающие нестационарные режимы переноса массы, импульса и энергии в турбулентном приближении в замкнутых областях при наличии тепловыделяющих элементов (радиаторов) с учетом влияния внешней окружающей среды на основе преобразованных переменных «функция тока – завихренность». Для эффективной реализации созданных математических моделей были сформулированы методы решения, созданы численные алгоритмы и программные коды на языке C++. Проведена верификация разработанных математических моделей и численных алгоритмов на известных экспериментальных данных и модельных задачах. Проведен анализ влияния сеточных параметров на структуру течения и теплообмен в рассматриваемых объектах. Результаты сравнения разработанных математических моделей и используемого численного подхода с численными и экспериментальными данными других авторов показали достаточно хорошее согласие.

Проведено численное моделирование основных закономерностей гидродинамики и теплопереноса на основе сформулированных постановок с учетом всего спектра осложняющих факторов (нестационарность, теплофизические свойства ограждающих конструкций, размеры и интенсивность тепловыделяющих элементов (радиаторов), толщина твердых ограждающих стенок, оптические свойства среды и др.). В рамках проекта реализованы краевые задачи теплообмена в помещении (в том числе при наличии панорамного остекления) как с системой отопления «теплый пол», так и с локальным источником нагрева, работающим периодически. Численные исследования процессов тепломассопереноса в строительных сооружениях проводились в безразмерных переменных. Приведение системы уравнений к безразмерному виду дает нам возможность изучить рассматриваемые физические явления вне зависимости от выбора системы единиц, а также облегчает обобщение и сопоставление результатов исследования. Естественным образом при численном моделировании не составляет труда перейти от безразмерных переменных к размерным.

В результате проведенных исследований установлено, что увеличение значений степени черноты внутренних поверхностей приводит к снижению температуры внутри источника тепловыделения, а также к росту средней температуры в помещении. В частности увеличение данного параметра с 0.2 до 0.8 приводит к росту средней температуры на 3-5% в области решения. Также стоит

отметить небольшое снижение скорости конвективного течения в помещении с увеличением излучательной способности поверхности. Показано также, что при изменении степени черноты поверхностей от 0.6 до 0.8 среднее радиационное число Нуссельта может увеличиваться до 40%. Более того, вклад излучения в общий теплообмен имеет порядок, аналогичный порядку естественной конвекции.

При моделировании и проектировании сложных тепловых систем необходимо учитывать влияние положения и размеров источников тепловыделения. Данные источники могут быть элементами стены и пола либо занимать любую часть пространства в исследуемой области. С целью исследования гидродинамики и теплопереноса в исследуемой области, моделирующей помещение с системой обогрева «теплый пол», было изучено влияние размера и положения нагревательного элемента. Стоит отметить, что при фиксированных числе Рэлея и степени черноты поверхностей, среднее полное число Нуссельта значительно увеличивается с ростом параметра l/L , характеризующего размер нагревательного элемента. Реализованная в рамках проекта численная модель позволяет оптимально подобрать требуемые значения температуры воздуха в помещении с целью поддержания оптимального микроклимата.

Интенсивность объемного тепловыделения от нагревательного элемента характеризуется числом Остроградского (Os). В рамках проекта проанализировано влияние данного параметра на значения средней температуры внутри нагревательного элемента, максимальные значения функции тока, а также на значения средних радиационных и конвективных чисел Нуссельта на поверхности нагревательного элемента. Установлено, что увеличение Os от 0.01 до 0.5 увеличивает среднюю температуру внутри источника тепловыделения более чем на 30%. Более того, рост числа Остроградского приводит к увеличению всех рассматриваемых характеристик независимо от значений других определяющих параметров.

С помощью программного комплекса OpenFOAM проведено математическое моделирование тепломассопереноса в помещении $5 \times 3 \times 2$ м при наличии тепловыделяющего элемента. Рассмотрение нестационарных процессов переноса позволило акцентировать свое внимание на изучении процесса эволюции во времени термогидродинамических структур, что крайне важно при импульсной работе источников тепловыделения. Проведен анализ интенсивности падающего излучения, обратно пропорциональной квадрату расстояния от тепловыделяющего элемента. Показано также, что при исследовании процессов тепломассопереноса в строительных сооружениях, излучение может играть существенную роль даже в условиях относительно низких температур (температуры порядка 20-70 градусов).

Параметр f характеризовал периодичность тепловыделения. Уменьшение значений данного параметра приводит к росту периода колебаний. Результаты показали, что разработанная численная методика способна реализовывать задачи с переменным тепловыделением внутри нагревательных элементов (радиаторов). В результате численных экспериментов детально проанализирована структура

течения в области решения. Внутри помещения формируются две симметричные конвективные ячейки низкой интенсивности. Данные вихревые структуры отличаются, в первую очередь, направлением циркуляции газа, и их появление обусловлено несколькими причинами: теплообменом излучением, постоянным подводом тепла от тепловыделяющего элемента и воздействием внешней среды. Наличие восходящего потока теплого воздуха в центральной части полости отражает образование теплового факела. Когда значения степени черноты поверхностей увеличиваются, градиент температуры на поверхности нагревательного элемента уменьшается, и вклад естественной конвекции также ослабевает. Показано, что при увеличении данного параметра наблюдается характерное снижение интенсивности конвективного теплообмена (среднее конвективное число Нуссельта уменьшается до 10% при изменении степени черноты поверхностей от 0.3 до 0.9) при одновременном росте среднего радиационного числа Нуссельта (изменение излучательной способности от 0.3 до 0.9 приводит к увеличению среднего радиационного числа Нуссельта более чем в 3 раза). В результате проведенных исследований, показано, что чернение источника тепловыделения может приводить не просто к снижению средней температуры внутри источника, но и установлено, что это снижение может достигать 20 %.