

Экспериментальное исследование и численное моделирование теплообмена тяжёлого жидкого металла к проблеме создания термоядерного источника нейтронов

Работа проводилась в 2010 - 2012 г.г. в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

государственный контракт № 14.740.11.0156

Научный руководитель проекта: д.т.н., проф. В.Г.Свиридов

Ответственный исполнитель: с.н.с. А.И.Карякин

Описание разработки

Проведено аналитическое исследование по методам измерений и расчётов характеристик МГД - теплообмена потоков жидкого металла.

Проведена подготовка оборудования ртутного МГД - стенда, в том числе выбраны программно - аппаратные средства для математического моделирования МГД – теплообмена при течении ртути в трубе в магнитном поле (МП).

Впервые проведены подробные исследования характеристик теплообмена при течении жидкого металла в горизонтальной трубе с однородным обогревом ($q_c = \text{const}$) с плотностью теплового потока $q_c = 5 \div 55 \text{ кВт/м}^2$ в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 5000 \div 100000$, без магнитного поля и в продольном и поперечном магнитном поле при разных значениях числа Гартмана $Ha = 0 \div 500$. Выполнены измерения полей осредненной температуры, распределения локальных и средних коэффициентов теплоотдачи, статистических характеристик турбулентных пульсаций температуры (интенсивности, автокорреляционные функции и спектры), а также профилей продольной и поперечной (вертикальной) компонент скорости в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Гартмана.

Подробно исследованы статистические характеристики турбулентных пульсаций температуры при течении жидкого металла в горизонтальной трубе в продольном и поперечном магнитном поле.

Впервые исследованы профили продольной компоненты скорости корреляционным методом в горизонтальной обогреваемой трубе: получены распределения продольной скорости в сечении трубы в отсутствие и при наличии продольного и поперечного магнитного поля. Впервые измерены профили вертикальной компоненты скорости, то есть скорости вторичных течений, полученные электромагнитным датчиком скорости.

Впервые выполнено численное моделирование характеристик МГД-теплообмена при течении ртути в горизонтальной трубе с однородным обогревом без магнитного поля и в продольном и поперечном магнитном поле в условиях эксперимента. В расчётной сетке контрольных объемов получены трехмерные поля: давления, трех компонент скорости, температуры, потенциала электрического поля, трех компонент электрического тока, а также распределения локальных и средних чисел Нуссельта.

Проведены подробные исследования характеристик теплообмена при течении жидкого металла в горизонтальной трубе с неоднородным обогревом с локальной плотностью теплового потока $q_c = 5 \div 55 \text{ кВт/м}^2$ в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 5000 \div 100000$, без магнитного поля и в продольном и поперечном МП при разных значениях числа Гартмана $Ha = 0 \div 500$. Рассмотрен однородный по длине и неоднородный в поперечном сечении – двухсторонний «справа-слева» обогрев. Подробно рассмотрены крайние случаи: обогрев только «сверху» или только «снизу».

Измерены профили вертикальной компоненты скорости, то есть скорости вторичных течений, полученные электромагнитным датчиком скорости.

Выполнено численное моделирование характеристик МГД-теплообмена при течении ртути в горизонтальной трубе с неоднородным (двухсторонним «слева-справа») обогревом в условиях эксперимента.

Результаты расчётов полей температуры и скорости и распределений локальных и средних коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта) сопоставлены с аналогичными экспериментальными данными.

Подробно исследованы статистические характеристики турбулентных пульсаций температуры при течении жидкого металла в горизонтальной трубе с неоднородным обогревом в продольном и поперечном МП. В некоторых режимах (с достаточно большими значениями Gr/Re^2) при обогреве «снизу» впервые обнаружено появление низкочастотных пульсаций аномально высокой интенсивности в сильном МП.

Впервые проведены исследования при течении жидкого металла в трубе с наклоном 11,3 градуса при неоднородном по периметру обогреве. Исследования проводились в диапазонах соотношений безразмерных критериев: $Ha^2/Re=1\div 30$ $Gr/Re^2=0.2\div 2.2$ в случае однородного и одностороннего обогрева, а также промежуточные режимы обогрева.

Проведены численные расчёты в среде программирования ANES, верифицированные на опытных данных, полученных в эксперименте на ртути в соответствующих условиях. Доказана возможность использования применяемой модели для расчёта течения и теплообмена жидкого металла в трубах и каналах разной геометрии, разных конфигураций течения по отношению к векторам силы тяжести и индукции магнитного поля, в том числе в канале прямоугольного сечения, расположенного вертикально в поперечном магнитном поле при разных вариантах обогрева стенок канала.

Научная новизна и особенность проведённых исследований заключается в том, что проблемы магнитной гидродинамики весьма актуальны и в других электропроводных средах. Новизна научного подхода в данной работе основана на решении задачи исследования совместного воздействия массовых сил различной природы – электромагнитных и гравитационных на течение электропроводных сред и процессы переноса в них.

Область применения результатов проекта

Результатами проводимых исследований являются методики получения верификационных математических моделей для инженерно-технических расчётов теплообменного оборудования, использующего различные типы жидкометаллических теплоносителей для создания жидкометаллических систем охлаждения для перспективных энергетических установок в интересах национальных и международных проектов (например, международного проекта строительства термоядерного реактора ИТЭР), программ в области реакторов на быстрых нейтронах и реакторов - токамаков, наукоёмких металлургических предприятий (совершенствование МГД - процессов в металлургии в области выращивания кристаллов с уникальными свойствами и производства гомогенных сплавов).

Практическая особенность работы связана с целым рядом приложений магнитной гидродинамики в промышленности - металлургии, плазменных и космических технологиях, атомной и термоядерной энергетике.

Социально-экономический эффект от результатов работ по проекту выражается, в частности, в уменьшении отрицательного техногенного воздействия на окружающую среду за счёт применения в термоядерных реакторах надёжных теплообменных жидкометаллических устройств, спроектированных с учётом полученных в работе математических моделей МГД-теплообмена, верифицированных уникальными экспериментальными данными.

Область применения: перспективная ядерная и термоядерная энергетика, авиакосмическая отрасль, металлургия специальных сплавов.