

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В НАКЛОННОМ ПРОДОЛЬНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

Пивоваров Д. Е.

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

В работе представлены результаты 3-мерного численного моделирования конвективных течений при тепловой гравитационной конвекции в продольном слое жидкости с произвольной ориентацией потока тепла к силе тяжести.

Под слоем жидкости понимается замкнутая область пространства, ограниченная двумя параллельными поверхностями с различной температурой, вследствие чего может возникать конвективное течение. При различных ориентациях поверхности нагрева к силе тяжести различают два механизма конвекции. Первый вызван неустойчивым положением равновесия нагретой жидкости при подогреве снизу (горизонтальный слой жидкости), а второй вызван отсутствием равновесия при боковом подводе тепла (вертикальный слой жидкости). При произвольной ориентации поверхности оба механизма вступают во взаимодействие между собой, формируя ту или иную картину течения. С подобными явлениями встречаются в энергетической и аэрокосмической отраслях, а именно, при проектировании солнечных коллекторов, систем охлаждения ядерных реакторов, хранения низкотемпературных компонент топлива и др. [1].

В экспериментальной работе [2] слои подразделяются на два класса: поперечные и продольные. В первом случае слой поворачивается вокруг длинной стороны, т.е. глубина его велика по сравнению с расстоянием между изотермическими поверхностями. Во втором случае изменение угла наклона происходит вокруг короткой стороны, но не просто короткой по сравнению с длиной, а меньшей по сравнению с расстоянием между изотермическими поверхностями. В работе [2] впервые экспериментально изучались именно продольные слои. Настоящая работа продолжает изучение продольных слоев методом численного моделирования.

Для решения задачи используется численная схема [3, 4], которая успешно применялась для прямого моделирования изотермических течений в ортогональных системах координат, в частности, для расчета изотермических течений в эллиптических трубах [5]. Данная схема обладает свойством консервативности и расширена на случай неизоотермических течений, где дополнительно решается уравнение переноса тепла в жидкости [6].

Задача решается на разнесенных сетках. Пространственные производные аппроксимируются центральными разностями со вторым порядком точности, интегрирование по времени ведется методом Рунге – Кутты третьего порядка. Относительно вязких членов интегрирование ведется неявно. Шаг по времени выбирается автоматически с проверкой выполнимости условия Куранта.

Расчеты проводились в ограниченной твердыми стенками прямоугольной полости с соотношением сторон $4 \times 0.5 \times 1$, подогреваемой снизу, при ламинарном режиме конвекции $Ra = 10^3 - 10^5$. Полость, заполненная воздухом ($Pr = 0.72$), поворачивалась вокруг короткой стороны, что соответствует продольной конфигурации, отличной от поперечной, рассматриваемой в ряде работ, где вращение осуществляется вокруг длинной стороны. Угол наклона полости изменялся в различных направлениях между горизонтальным и вертикальным положениями слоя для изучения влияния начальных условий на конвекцию.

Установлено, что конвективное взаимодействие проявляется по-разному в зависимости от направления угла наклона слоя и числа Рэлея. Конвективные течения, вызванные разными механизмами, могут как подавлять друг друга, так и вносить общий вклад в конвективный теплообмен. Существуют случаи, когда при подъеме слоя подъемно-

опускное течение перестраивает ячейки таким образом, что их вклад в конвекцию увеличивается.

Найдены характеристики среднего теплообмена, по которым построены карты конвективных режимов при различных сценариях поворота слоя. По построенным картам исследовано явление гистерезиса, которое возникает вследствие различной устойчивости той или иной формы установившегося течения. Показано, что наиболее устойчивым многоячейковым течением является то, которое устанавливается перед последней бифуркацией при положительном изменении угла. При фиксированном угле и варьировании числа Рэлея гистерезис не наблюдался.

Показано, что для рассмотренной геометрии невозможно двумерное приближение.

Автор работы выражает благодарность В. И. Полежаеву за обсуждение выполненной работы и Н. В. Никитину за консультацию по методике расчета. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-08-000034).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Polezhaev V. I., Myakshina M. N., Nikitin S.A.* Heat transfer due to buoyancy-driven convective interaction in enclosures: Fundamentals and applications // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. V. 55. 1–3. P. 156–165.
2. *Symons J. G., Peck M. K.* Natural Convection Heat Transfer Through Inclined Longitudinal Slots // *Journal of Heat Transfer*. 1984. V. 106. 4. P. 824–829 = *Симонс, Пек* Теплоотдача при свободной конвекции через наклонные продольные щели // *Теплопередача*. 1984. Т. 106. 4. С. 131–137.
3. *Nikitin N.* Third-order-accurate semi-implicit runge-kutta scheme for incompressible navier-stokes equations // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2006. V. 51. 2. P. 221–233.
4. *Nikitin N.* Finite-difference method for incompressible Navier–Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates // *Journal of Computational Physics*. 2006. V. 217. 2. P. 759–781.
5. *Никитин Н. В.* Прямой расчет турбулентных течений в эксцентрических трубах // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2006. Т. 46. 3. С. 509–525.
6. *Пивоваров Д. Е., Пунтус А. А.* Алгоритм численного решения уравнений Навье – Стокса для задач конвективного теплообмена // *Модернизация и инновации в авиации и космонавтике*. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. С. 310–316.