

Совместное решение задачи динамики и теплопроводности реализовано в программном комплексе ФРУНД [2].

Список литературы

1. Internet resource. Open CASCADE Technology, 3D modeling & numerical simulation. – URL: <http://www.opencascade.org>, 2010.
2. Internet resource. Software for simulation the multibody dynamics of the rigid and flexible bodies. – URL: <http://www.frund.vstu.ru>, 2010.
3. Maki K. Habib, Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots, 2007.
4. Principles of CAD/CAM/CAE Systems, Kunwoo Lee, 2004.
5. Vittendurg I.S. The dynamics of solid body system, 1980.

¹А.Н. Шарифулин, ²С.А. Суслов

¹Пермский государственный технический университет

²Swinburne University of technology, Hawthorn, Australia

КОНВЕКТИВНЫЕ БИФУРКАЦИИ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В НАКЛОНЯЕМОЙ ПОЛОСТИ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Рассматривается стационарная двумерная конвекция воздуха в цилиндрической горизонтальной полости квадратного сечения, две противоположные стенки которой теплоизолированы, а в двух других поддерживаются постоянные различные температуры. Полость может медленно наклоняться на произвольный угол так, что цилиндр все время остается горизонтальным, а направление подогрева жидкости из-за этого может плавно изменяться от направления подогрева снизу к направлению подогрева сбоку и так до подогрева сверху и обратно. Основное внимание уделено определению бифуркационной кривой на плоскости параметров: число Релея-угол наклона полости, при пересечении которой стационарный режим конвекции испытывает бифуркации.

Интерес к стационарным режимам конвекции воздуха в замкнутой наклоняемой полости связан с надеждой, что через по-

нимание закономерностей их бифуркаций в лабораторных моделях будет понят механизм зарождения сложных атмосферных явлений. Наклон полости используется для лабораторного моделирования, например, внезапного зарождения тропических циклонов [1] и парадоксального переноса загрязнений воздуха из города в горные районы с дорогой недвижимостью [2]. Стационарные режимы тепловой конвекции воздуха в замкнутой полости часто имеют форму валов, т.е. вихрей с горизонтальной осью. В них частицы жидкости движутся вдоль плоских линий тока вокруг точки пересечения этой плоскости с осью вихря. Поэтому такие режимы можно назвать квазидвумерными. Это обстоятельство позволяет авторам данной работы надеяться, что исследование плоских двумерных течений воздуха, т.е. бесконечно вытянутых горизонтальных вихрей, в абстрактных бесконечных цилиндрах поможет в понимании закономерностей бифуркаций стационарных режимов конвекции в полостях лабораторных экспериментов. Бифуркации конвективных течений воздуха, вызванные наклоном экспериментально начались изучаться для кубической полости, подогреваемой снизу в [3], где

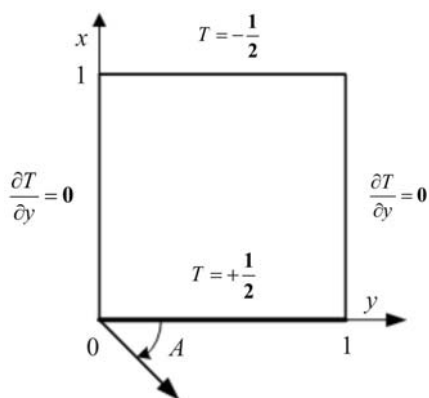


Рис. 1. Условия подогрева на твердых стенках полости. Направление вниз показано стрелкой и составляет с осью Y угол A

были рассмотрены лишь малые девиации угла наклона, соответствующего подогреву строго снизу. Поясним, что наклон при малых значениях числа Рэлея приводит к формированию горизонтального вихря с таким направлением циркуляции, что воздух, прилегающий к наклоненной нагретой нижней стенке полости, движется вверх. Это вихрь с нормальным вращением, если полость привести в горизонтальное положение, он прекратит свое вращение.

Однако при значениях числа Рэлея, превышающих критическое, наряду с таким нормальным вихрем возможен и вихрь с обратным

направлением циркуляции, т.е. аномальный вихрь. В таком вихре воздух вдоль нагретой нижней грани куба движется вниз.

Целью настоящей работы было теоретически, путем численного решения полных уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска, определить величину критического угла наклона, до достижения, которого возможно существование такого аномального вихря.

Рассматривается свободная тепловая конвекция несжимаемой жидкости в бесконечной замкнутой полости квадратного сечения с твердыми границами. Две противоположные стенки полости теплоизолированы, а две других поддерживаются при постоянных различных температурах, как показано на рис. 1. Введем угол наклона полости A так, что значение $A = -90^\circ$ соответствует подогреву снизу, а $A = 90^\circ$ – сверху. При подогреве снизу возможно условие механического равновесия и конвективное движение возникает в результате fork type bifurcation при превышении числом Рэлея критического значения $R_c = 2586$ [4]. При превышении числом Рэлея критического значения R_c устанавливается стационарный одноячеистый режим конвекции.

Причем возможны два надкритических режима, отличающихся друг от друга лишь направлением циркуляции. Для произвольных значений A до настоящей работы задача не исследовалась. Имеется лишь работа [5], где в аналогичной постановке изучен случай идеально теплопроводных границ. Основное внимание в ней уделено построению бифуркационных диаграмм

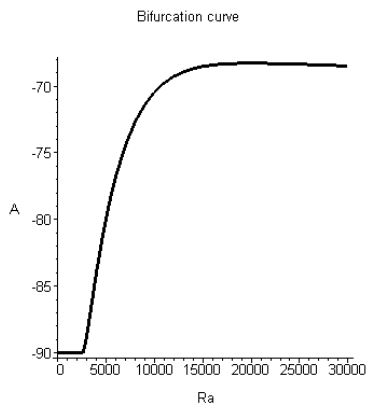


Рис. 2. Бифуркационная кривая. Область под ней характеризуется наличием трех вихревых решений – двух устойчивых с аномальным и нормальным направлением циркуляции (см. определения в тексте) и неустойчивого по седловому типу с нормальным направлением циркуляции

и бифуркациям между одно- и двухвихревыми течениями. Получены устойчивые режимы стационарного аномального вихря для значений девиации от угла наклона, соответствующего подогреву снизу в 1° и 5° . Бифуркационная диаграмма, определяющая границы существования аномального вихря, была построена для значения числа Прандтля $Pr = 1$ конечно-разностным методом для цилиндра кругового сечения [6]. Бифуркационная кривая имела экстремум, максимальное значение критического угла составляло 12° при $Ra = 2Ra_c$.

В настоящей работе использовался метод Петрова-Галеркина [7], который позволил получить как устойчивые, так и неустойчивые стационарные решения задачи. В качестве базисных функций использовались полиномы Чебышева.

Расчеты проводились на одном процессоре компьютера с производительностью около 1000 GFlops. Время вычислений для стационарных режимов было порядка нескольких минут, интегрирование по времени занимало несколько часов.

Бифуркационная кривая, определяющая область существования аномального вихря, представлена на рис. 2. Видно, что критический угол достигает значения в 22° . Отметим, что в области под бифуркационной кривой кроме аномального вихря и основного нормального вихря имеется еще один вихрь с нормальным направлением циркуляции, но неустойчивый. Его неустойчивость имеет седловой характер, т.е. существует направление в фазовом пространстве, для которого он является притягивающим. Это означает, что он может наблюдаться некоторое (не обязательно короткое) время в численном или лабораторном эксперименте.

В заключение отметим, что бифуркационная кривая, как и кривая, полученная в [6], имеет экстремум. Однако этот экстремум значительно менее выражен, что говорит о том, что область существования устойчивого аномального вихря для цилиндра с квадратным сечением значительно шире, чем для кругового цилиндра. Это позволяет предположить, что на степень уменьшения критического угла с ростом числа Рэлея отрицательное влияние оказывают факторы наличия углов отношение площади границ к объему жидкости.

Список литературы

1. Sharifulin A., Poludnitsin A., Kravchuk A. Bulletin of the American Physical Society, 2007. 52, 17, p. 168–169.
2. Princevac M., Fernando H. J.S. Physics of fluids, 2007. 19, 105102.
3. Zimin V., Ketov A. Izvest. AN SSSR.Mekh.zhigkosti i gaza, 1974. 5. P. 110–114.
4. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii Convective Stability of Incompressible Fluids. – Moscow: Nauka, 1972.
5. Mizushima J., Hara Y. Journal of the Physical Society of Japan, 2000. 69, 2371–2374.
6. Nikitin A., Sharifulin A. HEAT TRANSFER-Soviet Research, 1989. 21, 213–221.
7. Suslov S.A., Paolucci S. A.:Proc. Of the ASME Heat Transfer Division, 2001. 4, 39–46.

Л.П. Шингель

Пермский государственный технический университет

О РАСЧЕТЕ ТОРСИОНА НЕСУЩЕГО ВИНТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВЕРТОЛЕТА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРА

При разработке несущей системы вертолетов и некоторых самолетов вертикального взлета и посадки, особенно имеющих небольшой взлетный вес, прогрессивным является использование торсиона для установки лопастей несущего винта. Еще в 1977 г. в литературе отмечалась эффективность несущих винтов со втулкой полужесткого типа, использующих упругую торсионную подвеску. Одновременно отмечался большой объем расчетно-конструкторских работ и исследований, необходимых для получения удовлетворительных характеристик такой подвески.

В работе рассмотрен торсион втулки двухлопастного несущего винта легкого экспериментального самолета вертикального взлета и посадки, аналогичный торсиону вертолета Rotorfly. Торсион выполнен из набора чередующихся слоев стеклопласти-