

УДК 536.25

**ОПЫТ ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПЕРЕХОДНОЙ И ТУРБУЛЕНТНОЙ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА  
У НАГРЕТОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ**

© 2011 г.

*Е.М. Смирнов, А.Г. Абрамов*

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

aero@phmf.spbstu.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

Представлены результаты прямого численного моделирования (DNS) переходного и турбулентного режимов свободной конвекции воздуха, развивающейся у нагретой вертикально ориентированной пластины. Расчеты проводились в условиях известных из литературы экспериментов с использованием двух вычислительных подходов – Temporal (Time-developing) DNS (TDNS) и Spatial DNS (SDNS). Анализируются возможности указанных подходов применительно к рассматриваемой проблеме. Обсуждаются особенности задания начальных возмущений и степень их влияния на условия ламинарно-турбулентного перехода в свободно-конвективном пограничном слое. Для турбулентного режима конвекции выполнено сравнение осредненных и пульсационных составляющих рассчитанных полей с экспериментальными профилями и данными расчетов других авторов, показавшее хорошую степень согласованности результатов.

*Ключевые слова:* свободная конвекция, вертикальная пластина, турбулентность, ламинарно-турбулентный переход, прямое численное моделирование (DNS), Time-developing DNS.

**Введение**

Наблюдающийся в последние годы постоянный рост мощности компьютеров в сочетании с интенсивным развитием средств и технологий параллельных вычислений позволяет все шире вводить в практику вычислительной гидродинамики ресурсоемкие вычислительные подходы и методики, обладающие высокой степенью точности и информативности получаемых результатов. Наиболее строгим и надежным подходом является метод прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation, DNS), предполагающий разрешение всех значимых временных и пространственных масштабов течения. Рассматриваемая задача о развитии турбулентного свободно-конвективного течения у нагретой вертикальной пластины привлекает внимание исследователей на протяжении долгого времени. Особый интерес связан с проблемой адекватного предсказания структуры ламинарно-турбулентного перехода в свободно-конвективном пограничном слое, а также с последовательным анализом влияния различных факторов на условия и общую картину переходного процесса.

**Постановка и вычислительные аспекты**

Математическая модель, принятая за основу для описания турбулентной свободной конвекции несжимаемой ньютоновской среды с постоянными физическими свойствами, базируется на системе нестационарных трехмерных уравнений Навье – Стокса, дополненных уравнением баланса энергии, при учете эффектов плавучести в поле силы тяжести в приближении Буссинеска. Задача ставилась для условий надежных экспериментов [1], посвященных исследованию турбулентного режима свободно-конвективного пограничного слоя в воздушной среде, развивающегося у нагретой изотермической вертикальной пластины высотой 4 м и шириной 1 м. Расчеты выполнялись на вычислительном кластере кафедры гидроаэродинамики СПбГПУ с использованием параллельной версии широко апробированного конечно-объемного CFD-кода исследовательской направленности, в котором пространственная дискретизация осуществляется со вторым-третьим порядком точности, а для продвижения во времени используется неявная схема второго порядка [2].

Использовались два различных вычислительных подхода – Temporal (Time-developing) DNS (TDNS) и Spatial DNS (SDNS). Метод TDNS основан на подмене пространственного развития моделируемого течения временным: время выступает в роли координаты, в направлении которой происходит развитие основного течения. Данный подход в сравнении с методом SDNS, предполагающим моделирование пространственно-временного развития течения, позволяет существенно экономить на размере расчетной области и, как следствие, на общем времени вычислений. Многообещающие результаты применения метода TDNS к расчету свободно-конвективного течения рассматриваемого типа представлены недавно в работе [3].

В вариантных расчетах, проведенных по методу TDNS, расчетная область имела форму куба с длиной ребра 0.24 м и была покрыта неравномерной сеткой размерностью 3.2 млн. ячеек. Температура нагретой вертикальной стенки составляла 60 °С. Параллельная стенке внешняя граница рассматривалась как выходная с заданным на ней постоянным давлением и температурой, равной 16 °С. По однородным координатам (вертикальной и трансверсальной) ставились условия периодичности. Шаг по времени был выбран равным 0.002 с. При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных в качестве масштаба длины использовалась интегральная толщина развивающегося во времени скоростного пограничного слоя  $\delta$ . Профиль вертикальной компоненты скорости, по которому вычислялось значение  $\delta$  для каждого момента времени, находился путем осреднения рассчитанного поля скорости по однородным направлениям. Специальная серия расчетов по методу TDNS была проведена с целью изучения влияния на процесс ламинарно-турбулентного перехода в свободно-конвективном пограничном слое контролируемого уровня начальных возмущений в среде, для чего в расчетах задавались определенная интенсивность и спектр вырождающейся изотропной турбулентности.

В тех же условиях методом SDNS было проведено численное моделирование пространственного развития конвекции. Здесь расчетная область имела форму параллелепипеда размером 1.92×0.24×0.24 м. Размерность расчетной сетки составляла 26.2 млн. ячеек с сохранением параметров сетки, использованной в методе TDNS. Условия периодичности накладывались только по трансверсальной координате, а горизонтальные границы расчетной обла-

сти, стыкующиеся со стенкой высотой 1.92 м, рассматривались как выходные.

### Результаты расчетов и обсуждение

С применением современных средств и методик визуализации выполнен анализ процесса ламинарно-турбулентного перехода и эволюции возникающих в пограничном слое вихревых структур: исходно двумерных волн с их последующей трехмеризацией и разрушением; дискретно расположенных крупномасштабных вихревых структур подковообразной формы с направленными вверх «ножками»; множества разномасштабных вихрей в режиме развитой турбулентности.

Согласованное сопоставление результатов TDNS с данными экспериментов [1] подразумевает переход от временного описания процесса к пространственному. В частности, для нахождения критического значения числа Грасгофа выполнялся отдельный расчет пространственного нарастания толщины двумерного стационарного ламинарного свободно-конвективного пограничного слоя, что позволяло определить зависимость  $\delta(x)$  и, исходя из вычисленной по данным TDNS зависимости  $\delta$  от времени, найти критическое значение продольной координаты  $x_{cr}$ . Установлено, что при полном отсутствии начальных физических возмущений в среде имеет место существенное затягивание перехода ( $x_{cr} \approx 2.7$  м), а при наложении контролируемого уровня начальных возмущений увеличивающейся интенсивности пространственное положение точки перехода, после резкого смещения к нижнему краю пластины, стабилизируется, приближаясь к экспериментальному ( $x_{cr} \approx 0.7$  м). При задании начальных возмущений среды во всех режимах конвекции было получено хорошее согласие с экспериментальными значениями и данными TDNS [3] и по зависимости числа Нуссельта от числа Грасгофа. Сравнение расчетных и экспериментальных (измеренных при  $x \approx 1.44$  м) [1] профилей температуры, вертикальной скорости и пульсационных характеристик турбулентной конвекции производилось в момент времени, когда расчетное значение  $\delta$  совпадало с экспериментальным. Показано, что в безразмерном виде рассчитанные профили весьма удовлетворительно согласуются с экспериментальными, что соответствует и результатам работы [3]. Однако расчетное значение максимальной скорости примерно на 40% превосходило экспериментальное.

Расчеты по методу SDNS, начинавшиеся с возмущенного поля скорости, позволили полу-

чить весьма близкие к экспериментальным [1] профили вертикальной скорости и других измеренных в турбулентном режиме величин. Причиной такого улучшения результатов, по-видимому, является учет (отсутствующего в TDNS-постановке) эффекта захвата свободно-конвективным пограничным слоем холодного окружающего воздуха.

Последующие исследования в рамках метода SDNS будут направлены на изучение влияния уровня начальных возмущений в среде на положение точки перехода.

#### Список литературы

1. Tsuji T., Nagano Y. Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // Int. J. Heat Mass Transfer. 1988. Vol. 31, No 8. P. 1723–1734.
2. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Науч.-технич. ведомости СПбГПУ. 2004. №2 (36). С. 70–81.
3. Abedin M.Z., Tsuji T., Hattori Y. Direct numerical simulation for a time-developing natural-convection boundary layer along a vertical plate // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. Vol. 52, No 19–20. P. 4525–4534.

### EXPERIENCE WITH DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF TRANSITIONAL AND TURBULENT AIR NATURAL CONVECTION ON A HEATED VERTICAL PLATE

*Е.М. Смирнов, А.Г. Абрамов*

Results of direct numerical simulation (DNS) of transitional and turbulent regimes of air natural convection developing at a heated vertical plate are presented. The computations have been performed under conditions of experiments known from the literature. Two computational approaches were used: Temporal (Time-developing) DNS (TDNS) and Spatial DNS (SDNS). The potential of both the approaches for reproducing the flow under consideration has been analyzed. Influence of initial disturbances on laminar-turbulent transition in the free-convection boundary layer is discussed. A comparison of averaged and pulsating components of the flow fields computed with experimental data and findings of numerical studies of other authors has demonstrated good agreement of the results.

*Keywords:* natural convection, vertical plate, turbulence, laminar-turbulent transition, direct numerical simulation (DNS), Time-developing DNS.