ния L. Если число Kn > 1, то число столкновений между молекулами газа в области течения мало, по сравнению с числом столкновений молекул с поверхностью тела, и ошибки в вычислении интеграла столкновений мало влияют на результат решения задачи. В случае Kn < 1 определяющими становятся процессы столкновения молекул в газе и ошибки в вычислении интеграла столкновения приводят сначала к увеличению количества итераций, необходимых для получения решений, а затем при уменьшении числа Kn и к невозможности получения решения.

Для того чтобы можно было решать задачи при произвольном числе Kn, были предложены методы прямого статистического моделирования.

В основе методов прямого статистического моделирования лежит допущение, что реальную среду, в которой количество молекул практически не ограничено, можно заменить средой, в которой задается система из конечного числа моделирующих частиц.

Расчетная область разбивается на ячейки с линейным размером λ меньшим местной длины свободного пробега. N частиц распределяются в начальный момент времени по ячейкам в соответствии с начальной функцией распределения. Эволюцию системы за малое время Δt можно расщепить на два этапа: релаксацию подсистем в ячейках столкновения частиц и последующее передвижение всех частиц пропорционально их скорости и Δt бесстолкновительный перелет. Стационарное распределение всех параметров среды вычисляется после установления процесса во времени и усреднения по всем частицам и временным шагам.

Так, например, плотность n, скорость V, температура T каждой ячейке на некотором шаге определяются по формулам

$$n = \frac{n_1}{N_0}; \quad V = \frac{1}{N_1}\sum_{j=1}^{N_1} C_j;$$

$$T = \frac{2}{3}\frac{1}{N_1}\sum_{j=1}^{N}\frac{m}{2}\left(C_j - 1\right),$$

где N_1 – число частиц в ячейке в момент времени t; N_0 – начальное число частиц; C_j – скорость j-й частицы; m – масса частицы.

Таким образом, алгоритм методов прямого статистического моделирования состоит на двух этапов:

1 этап: столкновения частиц в ячейках,

3 этап: свободномолекулярный перенос.

Этап свободномолекулярного переноса осуществляется так же как и в случае метода Хэвиленда, то есть частицы передвигаются из ячейки и ячейку пропорционально своим скоростям. Если обозначить конечные координаты частиц X'_1, а начальные X, $i = 1, ..., N$, то

$$X'_1 = X_1 + C_1\Delta t.$$

Во время этого этапа частицы могут покинуть расчетную область, столкнуться с поверхностью тела, в этом случае они отражаются от поверхности тела со скоростями, соответствующими граничной функции распределения. В момент столкновения с поверхностью вычисляются импульс и энергии, приносимые на поверхность тела. На этом этапе в области появляются частицы со скоростями, соответствующими функций распределения на внешней границе расчетной области.

Наиболее сложным для реализации в методах прямого статистического моделирования является 1 этап – столкновения частиц в ячейках. На этом этапе в каждой ячейке задана система из N частиц со скоростям C_1, ..., C_N. Система может переходить из одного состояния в другое только посредством столкновения частиц. Задача этапа состоит в том, чтобы найти скорости частиц через время Δt.

Отметим, что перспективность использования метода прямого статистического моделирования связана с построением кинетических моделей турбулентности, замкнутых на уровне функции распределения пульсаций. Такие модели имеют, как правило, меньше число эмпирических констант. В то же время кинетические модели более информативны, так как они дают функцию распределения пульсаций.

Данное направление интенсивно развивается, в частности, можно надеяться на успех в решении более сложных задач турбулентности, когда крупно масштабные процессы вычисляются непосредственно по схемам расщепления для конечно-разностных уравнений переноса (например, с помощью метода крупных частиц или потоков), а локальные мелкомасштабные флуктуации моделируются статистическим путем. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (Проект № 14-11-00709).

РУКОВОДСТВО ПО КОМПЬЮТЕРНОЙ АНАЛИТИКЕ

Хлопков Ю.И., Жаров В.А., Горелов С.Л.

Московский физико-технический институт, Жуковский, e-mail: zayyarmyomyint@gmail.com

В данном руководстве рассматривается пакет программ MATHEMATICA (Wolfram Research). Он замечателен тем, что на его примере легко освоить все имеющиеся к настоящему времени версии. Кроме того, он достаточно содержателен, чтобы его помощью можно было выполнять сложные операции, встречающиеся в повседневной практической деятельности, и не требует много места на жестком диске.

Руководство составлено на основе практики преподавания компьютерной аналитики на факультете аэромеханики и летательной техники Московского физико-технического института.

Предназначено для студентов, аспирантов и научных работников. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (Проект № 14-11-00709).

КОГЕРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Хлопков Ю.И., Жаров В.А., Горелов С.Л.

Московский физико-технический институт, Жуковский, e-mail: zayyarmyomyint@gmail.com

Излагаются основы ламинарного и турбулентного пограничных слоев. Дан критические анализ зарубежных экспериментальных работ, посвященных исследованию физики широкого круга процессов, протекающих в турбулентном пограничном слое. Особое внимание уделено когерентной составляющей поля завихренности. Приводятся оригинальные результаты, полученные авторами. Рассмотрены вопросы детектирования искусственного воспроизведения ряда элементарных событий, наблюдаемых в процессах генерации завихренности в турбулентном пограничном слое на плоской пластине в несжимаемой жидкости. Некоторые явления интерпретированы с точки зрения теории динамических систем.

Настоящая монография посвящена одному из актуальнейших экспериментальных направлений исследования турбулентности – когерентным структурам в турбулентном пограничном слое на плоской пластине. Начало такого рода исследованиям было положено в работе Клайна, Рейнольдса. Шрауба и Рунштадлера. Это направление скорее качественного, чем количественного исследования турбулентности уже длительное время развивается в ряде стран, а также отечественными исследователями, и к настоящему времени получено много интересных результатов, интенсивно обсуждаемых специалистами.

Чтобы отчетливо выявить историческую тенденцию, трудности, спорные места, в монографию включены результаты работ крупных зарубежных представителей этого направления, подводящие итоги определенных этапов этих исследований. Собраны результаты длительных экспериментальных исследований по выделению и определению свойств когерентных (динамических) структур, полученных энтузиастами этого направления в течение приблизительно 50 лет (с 1940–1950 г. по 2000 г.).

Эти исследования проводились зачастую наощупь, когда еще отсутствовали основные понятия, определения, установившаяся методика. Тем не менее, результаты, убедительно доказывают существование когерентного *динамического* компонента в турбулентных течениях, отличного от когерентных структур, образующихся вследствие ряда *кинематических* эффектов в стохастических полях. В работе определение когерентной структуры, которое позволяет свести воедино многочисленные частные формулировки, используемые другими исследователями, описаны требования к процедурам детектирования и выделения таких структур.

В связи с этим интересно отметить работы, проводимые в области создания искусственного интеллекта с целью распознавания образов. Укажем один из результатов в распознавании зрительных образов: входной сигнал перед обработкой на идентификацию образа подвергается логарифмированию. При этом геометрически подобные объекты в «перцептивном пространстве» оказываются равными по величине, но сдвинутыми друг относительно друга, что упрощает идентификацию схожих по геометрической конфигурации, но различных по размерам образований. Этим мы хотим подчеркнуть возможное взаимное влияние двух областей исследований.

Кроме того, в работе сопоставлены конкурирующие представления, выявлены сомнительные места в общепринятых рассуждениях и высказаны критические замечания. Результаты работы получены сравнительно недавно и подводят итог в решении проблем, которые были поставлены ранее при исследовании структур в турбулентном пограничном слое. В частности, приведены аргументы, позволяющие как будто бы окончательно решить вопрос о масштабировании частоты «берстинга», который решен на денном этапе, в противовес утверждению Кантуэлла, в пользу вязких масштабов. Необходимо отметить и то, что терминология в этой области не всегда оказывается достаточно установившейся. Это видно на примере терминов «шпилькообразный вихрь» и «подковообразный вихрь».

Исследователи убеждены, что все это разнообразие вихрей можно получить из шпилькообразных вихрей при различных числах Рейнольдса. Здесь, видимо, уместно провести аналогию между понятием когерентной динамической структуры в турбулентных течениях и понятием элементарной частицы в физике элементарных частиц. Для последней области характерны быстрые темпы развития, обусловленные взаимодействием теоретических и экспериментальных исследований, а также новейших методов компьютерной обработки и накопления информации. На ранних стадиях своего развития физика элементарных частиц «коллекционировала» элементарные частицы. На более поздних стадиях она перешла к попытке объяснения их свойств с помощью сведения к меньшему числу частиц. В результате появились так называемые кварки, которые вообще не являются наблюдаемыми непосредственно в эксперименте объектами! В настоящее время физика элементарных частиц рассматривает третье поколение кварков.

Так или иначе, в исследованиях турбулентных структур сейчас задействовано огромное