КРУПНОМАСШТАБНЫЕ СТРУКТУРЫ В ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЯХ И ПЛАМЕНАХ

Маркович Д.М., Дулин В.М., Шестаков М.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

В 1938 году, отвечая на комментарий Кармана, Толлмин и Прандтль высказали мнение о том, что во множестве случаев турбулентность характеризуется не только случайными, но и самосогласованными (когерентными) пульсациями. Позднее, Тоунсенд (Townsend 1956) и его ученики обозначили важную роль когерентных структур (в том числе крупномасштабных вихревых структур, КВС) в процессе тепломассопереноса в турбулентных потоках. Это послужило отправной точкой для представления динамики турбулентных сдвиговых течений как движение когерентных структур (Holmes et al. 1996) в "фоновой" турбулентности. Более глубокое понимание характеристик КВС и условий их формирования способствуют развитию эффективных методов управления тепломассопереносом в турбулентных потоках. В частности, эти методы нашли свое применение для струйных течений (см. Гиневский и др. 2001). Развитие вторичной неустойчивости для крупномасштабных вихревых образования оказывается не менее важным в ряде механизмов. В частности, недавние работы подняли вопрос о принципиальности роли вторичных продольных структур в процессе смешения и создания благоприятных условий для стабилизации высокоскоростных струйных факелов (Lawn 2009).

Темпы развития оптоэлектронных технологий привели к существенному шагу вперед в понимании гидромеханики турбулентных потоков, так как стали доступны для измерения такие величины, как пространственные распределения мгновенной скорости, получаемые при использовании методики particle image velocimetry (PIV). Регистрация оптических проекций (изображений) трассерных частиц в объеме и использование вычислительной томографии сделали возможным измерение трехмерных полей скорости в объеме. Это открыло путь к прямому измерению градиента поля скорости, оценки поля давления или локальной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности. Достигнутые частоты измерений в десятки килогерц приблизили производительность томографического PIV к методам численного моделирования. Однако зачастую большой объем данных значительно затрудняет их анализ и интерпретацию.



Рис. 1. (а) Схема течения плоской струи в щелевом канале. (б) Визуализация с использованием флуоресцентного красителя (Re = 2 0000, h/d =10). (в) Распределение крупных вихревых структур мгновенного поля скорости, измеренное томографическим методом PIV (Re = 2 0000, h/d =1). Изоповерхности Qкритерия окрашены в соответствии со знаком локальной продольной завихренности (светлые - положительные, темные - отрицательные)

Это объясняет возросший интерес к использованию подходов для понижения размерности стохастических динамических систем на основе методов линейной алгебры.

В данном докладе будут обсуждаться современные достижения и тенденции в области развития анемометрии по изображениям частиц, с акцентом на сдвиговые течения. Будут представлены результаты серии экспериментов по исследованию динамики турбулентного потока свободных осесимметричных струй, в том числе с закруткой и горением потока, а также плоской струи, распространяющейся в щелевом канале. Помимо локальной сдвиговой неустойчивости для данных потоков также проявляется интенсивная мода, вызывающая поперечное отклонение струй. В случае закрученных струй и пламени мода проявляется в прецессии течения, а в случае плоской струи в щелевом канале соответствует меандрированию потока.

На Рис.1 представлены примеры результатов визуализации и измерения трехмерного распределения мгновенной скорости. Помимо крупных вихревых образований, расположенных в шахматном порядке в слоях смешения струи, визуализация демонстрирует наличие продольных структур. Идентификация вихрей с использованием Q-критерия (отличие сверток тензоров завихренности и скоростей деформаций $Q = \Omega_{ij}\Omega_{ij}-S_{ij}S_{ij}>0$), рассчитанного по измеренным трехмерным распределениям мгновенной скорости подтверждает данный вывод. Во время меандирования струи между крупными вихрями противоположного знака в потоке усиливаются продольные вихревые структуры. Эти вихри существенно длиннее толщины щелевого зазора и играют важную роль в процессе смешения турбулентного потока с окружающей жидкостью.



Рис. 2. Структура течения (а,б) слабо- и (в,г) сильно-закрученных струй (Re =8900). (а,в) - осредненные данные, (б,г) – крупные вихревые структуры, визуализированы на основе Q критерия

На Рис. 2. представлены примеры результатов 3D измерений полей мгновенной скорости в закрученных струях без горения. Рассмотрено два случая: умеренная и сильная закрутка потока. Во втором случае, в отличие от первого, в потоке имеет место распад вихревого ядра, сопровождающийся наличием центральной зоны рециркуляции. В работе сделан вывод, что прецессирующее спиралевидное вихревое ядро и вторичные спиральные вихревые структуры присутствуют как при умеренной, так и при сильной закрутке потока. Отличие в том, что при распаде вихревого ядра динамика всего течения в существенной степени определялся спиральной автоколебательной модой, соответствующей вращению когерентной структуры, состоящей из вихревого ядра и внешнего спирального вихря. В случае умеренной закрутки потока, в процессе распада кольцевых вихрей на начальном участке слоя смешения образуются спиральные вихри, также играющие важную роль в процессе смешение струи с внешней жидкостью.

Список литературы:

- 1. Townsend A.A. The Structure of Turbulent Shear Flow. Cambridge University Press, 1956.
- 2. Holmes P., Lumley J.L., Berkooz G. Turbulence, coherent structures, dynamical systems and symmetry. Cambridge University Press, 1996
- 3. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М: Физматлит, 2001
- Lawn C.J. Lifted flames on fuel jets in co-flowing air // Progr. Energy Combust. Sci. 2009. V. 35. P. 1–30