

УДК 532.529.2

Конвективный теплообмен и турбулентность в динамически неравновесных течениях в канале
Михеев Н.И., Давлетшин И.А., Душин Н.С., Шакиров Р.Р.Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН,
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

В динамически неравновесном турбулентном течении характеристики турбулентности не успевают придти в равновесие с изменяющимися по времени или в пространстве условиями обтекания стенки. В данной работе изучались гидродинамические и тепловые процессы при двух различных способах создания динамически неравновесного пограничного слоя на плоской стенке канала: изменением относительного продольного градиента давления при стационарном потоке в канале переменного сечения либо путем изменения этого параметра во времени при вынужденных колебаниях потока в канале постоянного сечения.

Выполнен совместный анализ экспериментальных данных по турбулентности потока в стационарных градиентных и нестационарных (пульсирующих) канальных течениях. Локальный или мгновенный градиент давления характеризовался параметром равновесия Клаузера. Профили характеристик турбулентности обобщены как в координатах закона стенки с использованием динамической скорости, усредненной по текущей координате (в стационарном случае) или фазе пульсаций, так и с нормированием по средней скорости потока на входе в канал.

Экспериментально установлено, что подобие градиентных течений по локальному или мгновенному параметру Клаузера не обеспечивает подобия профилей характеристик турбулентности в пограничном слое градиентного течения. Традиционное представление характеристик турбулентности в координатах закона стенки с нормированием по локальной динамической скорости в условиях динамической неравновесности потока дает труднообъяснимые профили турбулентных характеристик потока. В диффузорном канале и в фазе торможения пульсирующего потока имеется тенденция к двум локальным максимумам в профиле турбулентности, причем энергия турбулентности в области дальнего от стенки второго максимума при $Y^+ > 100$ зачастую выше уровня максимума в буферной области пограничного слоя. При нормировании же характеристик по скорости потока на входе в канал можно сопоставлять уровень кинетической энергии турбулентности в едином масштабе по всей длине диффузора. Установлено, что энергия турбулентности вниз по потоку не только не увеличивается, но и существенно снижается, т.е. в целом в диффузорном канале средняя по сечению диссипация энергии турбулентности преобладает над генерацией. Другими словами, высокая интенсивность турбулентных пульсаций в толстом пристеночном слое, которую мы видим при нормировании характеристик турбулентности по локальной динамической скорости, формируется не в рассматриваемом сечении, а выше по потоку. Энергия образовавшихся выше по потоку турбулентных вихрей на временном масштабе движения в диффузоре дисси-

пирует сравнительно медленно и оказывается выше энергии вихрей, вновь образующихся в низкоскоростной области.

Пространственное и временное разрешение оптического метода измерений SIV позволяет выполнить оценку вклада генерации, диссипации, конвекции и диффузии в баланс энергии турбулентности в быстропротекающих процессах [1]. На основе SIV-измерений получена полная информация о членах баланса энергии турбулентности в градиентных течениях. Установлено, что в диффузорном канале, особенно в ближних к входу сечениях, конвекция турбулентности соизмерима с ее генерацией, а соотношение между этими членами баланса может являться мерой степени неравновесности потока. Другими словами, значительная доля энергии турбулентности переносится из области течения, расположенной выше по потоку. На профиль турбулентности в канале с динамическими воздействиями на поток влияют не столько локальные условия обтекания стенки, сколько конвекция и диффузия турбулентности. В диффузорном канале генерация турбулентности преобладает в пристеночной части в высокоскоростной области, откуда распространяется за счет конвекции ниже по потоку и выравнивается по сечению путем диффузии турбулентности.

Выполнено обобщение локального конвективного теплообмена в диффузорах и конфузорах в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Кейса. Получено обобщающее критериальное соотношение. Интересно отметить, что лучшим числом подобия для обобщения экспериментальных данных по локальной теплоотдаче в диффузоре оказалось число Рейнольдса, вычисленное по расстоянию от входа до локальной области и скорости потока на входе в канал (но не локальной скорости). Это вполне соотносится с выявленным механизмом формирования турбулентности в диффузорном канале, в котором важную роль играет конвективный перенос турбулентности. Для градиентных течений установлена тесная корреляционная связь между локальным числом Стантона и максимумом рейнольдсовых напряжений в пограничном слое над локальной областью стенки.

Управление неравновесностью потока можно использовать для целенаправленного изменения интенсивности процессов турбулентного переноса.

Список литературы:

1. Mikheev N. I., Goltsman A. E., Saushin I. I., Dushina O. A. Estimation of turbulent energy dissipation in the boundary layer using Smoke Image Velocimetry // Experiments in Fluids 58(8), 97 (2017).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-00355).