



XXXVI СИБИРСКИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ СЕМИНАР,

посвященный 70-летию академика РАН
Алексеевко Сергея Владимировича

5 – 7 октября 2020 г.
Новосибирск, Россия



N*



НКТМ
РАН



Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет

Сибирское отделение РАН Отделение энергетики,
машиностроения, механики и процессов управления

Российский национальный комитет по тепломассообмену
Новосибирский государственный технический университет

ООО "ЭиО-КОТЭС"

УДК 532.529.2

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ

Михеев Н.И., Душин Н.С., Душина О.А., Шакиров Р.Р.

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН, 420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

Представлены результаты исследования гидродинамических процессов в условиях динамической неравновесности течения, вызванной изменяющимся относительным продольным градиентом давления. Изучались два различных способа 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, представляющим собой отношение продольного градиента давления к поперечному градиенту касательных напряжений. Профили характеристик турбулентности обобщены в координатах закона стенки с использованием динамической скорости, усредненной по текущей координате (в стационарном случае) или фазе пульсаций. Экспериментально установлено, что подобие градиентных течений по локальному или мгновенному параметру Клаузера не обеспечивает подобия профилей характеристик турбулентности в пограничном слое градиентного течения. Полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что профили энергии турбулентности в градиентных течениях весьма чувствительны не только к локальной или мгновенной (для пульсирующих потоков) величине параметра Клаузера, но и к темпу его изменения по пространственной координате (для пульсирующих потоков - по времени).

Установлена высокая чувствительность энергии турбулентности в пограничном слое градиентного течения к темпу изменения параметра Клаузера и предложен механизм его влияния. Этот механизм основан на гипотезе о том, для перехода из одного состояния динамического равновесия в другое требуется некоторое время для перестройки профилей скорости, реинльдсовых напряжений и других характеристик турбулентности потока под изменяющийся по пространству или времени параметр Клаузера. Поскольку касательные напряжения в турбулентном потоке в основном определяются турбулентными пульсациями, порядок времени перестройки пропорционален интегральному масштабу и толщине слоя с наиболее высо-

кой энергией турбулентных пульсаций и обратно пропорционален среднеквадратичной скорости пульсаций поперечной компоненты скорости. Другими словами, это время, за которое в области интенсивной турбулентности вихревые структуры буферного слоя с масштабом порядка расстояния до стенки могут пройти как минимум расстояние порядка толщины этого слоя со скоростью порядка среднеквадратичной скорости пульсаций поперечной компоненты скорости. При экспериментально определенных типичных параметрах турбулентности за это время внешний поток перемещается относительно стенки на расстояние порядка $S^+ = 10000$ «вязких единиц» (отношение кинематической вязкости к динамической скорости) или не менее 10 толщин пограничного слоя. При медленном изменении параметра Клаузера (порядка 1 на указанном перемещении) течение можно считать равновесным, а при более быстром изменении градиентное течение является динамически неравновесным: характеристики турбулентности в пограничном слое турбулентного течения зависят не только от параметра Клаузера, но и темпа его изменения.

В динамически неравновесном пограничном слое с положительным градиентом давления экспериментально установлено повышение энергии турбулентных пульсаций, достигающее четырехкратного увеличения по сравнению с безградиентным течением. Кратно увеличивается и толщина самого слоя с высокой энергией турбулентных пульсаций, достигая в координатах закона стенки толщины более 100 единиц. В этом слое интенсивность турбулентных пульсаций медленно уменьшается с увеличением расстояния от стенки, а при некоторых условиях даже увеличивается с образованием максимума пульсаций аномально далеко от стенки, на расстоянии порядка 100 вязких единиц. Выявлен механизм такого аномального распределения турбулентных пульсаций. Фактически в области максимума пульсаций на аномально большом расстоянии от стенки мы видим отнесенный от стенки слой высокой турбулентности, сгенерированный выше по потоку в условиях более высокой динамической скорости. При быстром изменении параметра Клаузера новое динамическое равновесие не успевает установиться.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00355).
Частично представлены результаты, полученные при поддержке РФФИ (проект 19-08-00421).*