**DNS исследование турбулентного потока в канале с дискретными шероховатыми элементами.**

Численное исследование было выполнено для исследования турбулентного потока, управляемого давлением, в канале с шероховатой стержнем при числе Рейнольдса Re s ¼ 400 на основе среднего градиента давления. Обе стенки канала были шероховатыми квадратными стержнями с высотой k всего 1,7% от высоты канала или k channel 13: 6 в стеновых элементах. Отношение высоты звука к высоте составило 8, что соответствует так называемой шероховатости типа "k-type", и результирующее поле потока было классифицировано как "шероховатая с неустойчивая". Усредненная по Рейнольдсу схема обтекания показала два совместно вращающихся вихря, которые заполняли полость между двумя последовательными стержнями. Усредненное поле потока, которое отделялось от одного стержня, не было присоединено, и обратный поток наблюдался по всему дну полости. За пределами подслоя шероховатости, то есть за пределами 5k, заметного продольного изменения средней скорости и статистики второго порядка не наблюдалось, тогда как корреляция между продольными и нормальными по скорости стенками составляющими сохранялась несколько дальше от поверхности. Однако внутри подслоя шероховатости наблюдались значительные различия в поле турбулентности между слоями с гладкими и шероховатыми стенками, например, область высоких энергий, образованная слоем сдвига, исходящим из гребня элементов шероховатости. Визуализация мгновенных полей потока показала наличие удлиненных полосчатых структур, подобных тем, которые обычно наблюдаются в потоках вдоль гладкой поверхности.

**Введение**

Несмотря на обширные исследования потока пограничного слоя на шероховатых поверхностях, понимание физических механизмов в работе все еще является предметом дискуссий. Течение в подслое шероховатости является удивительно неоднородным, и это одна из причин, почему неполная информация доступна из экспериментальных исследований пограничных слоев с шероховатой стенкой. Другая трудность в экспериментах заключается в том, что высокие интенсивности турбулентности, встречающиеся вблизи элементов шероховатости, приводят к тому, что многие стандартные методы измерения (в частности, анемометрия с помощью проволоки X) страдают существенными ошибками, которые зачастую трудно диагностировать и исправлять (Raupach et al., 1991) ). Прямое численное моделирование (DNS), с другой стороны, позволяет исследовать пространственную и временную эволюцию поля турбулентного потока с такими подробностями, которые обычно недоступны в лаборатории.

В последние годы исследованию пограничного слоя с грубыми стенками уделялось значительное внимание. Измерения нескольких величин турбулентности и исследования когерентных структур в турбулентных пограничных слоях над шероховатыми стенами были выполнены, например, Вудом и Антонией (1975), Bandyopadhyay (1987), Krogstad et al. (1992), Grass et al. (1993), Krogstad и Antonia (1999), Djenidi et al. (1999), Антония и Крогстад (2001) и Баккен и Крогстад (2003). В то время как влияние шероховатости поверхности на профили средней скорости в настоящее время довольно хорошо документировано (например, Raupach et al., 1991 и Bergstrom et al., 2002), все еще существует неопределенность в отношении влияния шероховатой поверхности на турбулентные величины (Krogstad и Антония, 1999).

DNS, а также моделирование больших вихрей (LES), только недавно использовались для исследования турбулентных течений на неровных поверхностях. С точки зрения пограничного слоя атмосферы, Maass and Schumann (1994), De Angelis et al. (1997), Cherukat et al. (1998) и Henn and Sykes (1999) провели численное моделирование турбулентного потока в канале с синусоидальной нижней стенкой. Мияке и соавт. (2000) выполнили DNS турбулентного потока и теплообмена в плоском канале с шероховатостью песка на одной стенке. Целью данного исследования является исследование влияния мелких твердых полусферических элементов шероховатости на полностью развитый турбулентный поток в канале с использованием высокоточного моделирования DNS и LES. В частности, систематически исследуется влияние сдвигового числа Рейнольдса, размера шероховатости, расстояния и распределения (случайная или регулярная структура) для элементов шероховатости. Они продолжили свою работу, моделируя турбулентное течение в канале (Miyake et al., 2001 и Tsujimoto et al., 2001), в котором нижняя стенка была шероховатой с помощью двумерных поперечных квадратных стержней. Высота стержня k составляла 7% от высоты канала. Было показано, что основным эффектом шероховатости было усиление турбулентного перемешивания и теплообмена. Леонарди и др. (2003a, b) аналогичным образом выполнен DNS полностью развитого потока канала с шероховатой нижней стенкой и гладкой верхней стенкой. Шероховатая поверхность состояла из поперечных квадратных стержней, разделенных продольным расстоянием w. Высота прямоугольных стержней составляла 10% от высоты канала. Был рассмотрен широкий диапазон отношения высоты к высоте, k = k. Здесь k обозначает шаг, то есть продольную периодичность w þ k, индуцированную квадратными стержнями. Совсем недавно DNS одностороннего потока с шероховатыми стержнями был также выполнен Ikeda и Durbin (2002) и Nagano et al. (2003), тогда как результаты LES были представлены Cui et al. (2003). Общей чертой всех этих более ранних компьютерных симуляций является то, что только одна стенка канала была шероховатой, тогда как другая стенка оставалась гладкой. Высота элементов шероховатости обычно составляла от 5% до 10% от высоты канала.

В настоящей работе DNS впервые используется для моделирования турбулентного потока в канале, обе стенки которого шероховаты квадратными стержнями. Основная цель исследования состоит в том, чтобы исследовать влияние шероховатости на поля среднего и турбулентного потока и исследовать, как далеко от пристеночной области ощущаются эти эффекты. Для этого мы рассмотрим высоту шероховатости k, которая составляет всего 1,7% от высоты канала. Эта относительная высота шероховатости, таким образом, меньше, чем во всех предыдущих моделированиях, по крайней мере, в 3 раза.

**Конфигурация потока**

Эскиз, показывающий канал, ориентацию потока, систему координат и форму шероховатости, приведен на рис. 1. Принимается система координат, в которой x выровнен с основным направлением потока, y измеряется вертикально от нижней стенки, и z параллельна гребням шероховатости. Размер домена ðLx; Ly; LzÞ ¼ ð6: 528h; 2h; phÞ, то есть практически то же, что и при моделировании гладких каналов Moser et al. (1999) при их промежуточном числе Рейнольдса (далее обозначаемом MKM395).

Поток является статистически однородным в продольном направлении. Периодические граничные условия используются в продольном и продольном направлениях, а условия скольжения накладываются на все жесткие поверхности. Предполагается, что элементы шероховатости представляют собой двумерные поперечные квадратные стержни с поперечным сечением k k, расположенные в шахматном порядке на обеих стенках (рис. 1). Вычислительная область охватывает 24 квадратных стержня на каждой стене.

Отношение высоты звука к высоте k = k равно 8, что находится в диапазоне, который Furuya et al. (1976) было обнаружено, что они оказывают наибольшее влияние на профиль средней скорости. Perry et al. (1969) назвали этот тип конфигурации шероховатости «шероховатостью k-типа», поскольку функция шероховатости показала явную зависимость от k. Высота шероховатости составляет 1,7% от высоты канала (k ¼ 0: 034h), что в 13,6 раза больше шкалы вязкой длины m = us. Здесь нас определяют как dx 1 = 2, где q - плотность жидкости, а dP = dx - навязанный градиент давления. В соответствии с классификацией, предложенной Лиграни и Моффатом (1986), режим течения, таким образом, является переходно-шероховатым, т.е. поток зависит как от числа Рейнольдса, так и от высоты шероховатости.

**Численный метод и разрешение**

Основные уравнения для несжимаемой ньютоновской жидкости, т. Е. Уравнение Навье – Стокса и уравнение неразрывности, интегрируются по конечному объему в соответствии с методом баланса объема Шумана (1975). Полученные уравнения решаются численно на разнесенной и неоднородной декартовой сетке с помощью параллельного компьютерного кода MGLET (Manhart, 2004). Давление определяется в центре каждой ячейки сетки и составляющих скорости на границах раздела. Компоненты скорости и их производные получаются путем линейной интерполяции и центральных разностей соответственно. В результате пространственная дискретизация имеет точность второго порядка. Используя схему перепрыгивания для явного интегрирования во времени уравнений импульса, достигается точный временной шаг второго порядка. Эта комбинация центральной разности и временного шага скачка является энергосберегающей для одномерного уравнения конвекции и поэтому подходит для DNS. Уравнение Пуассона для давления решается многосеточным методом, основанным на точечных итерациях скорость-давление. Вычислительная сетка делится на произвольное количество подсеток, которые обрабатываются как независимые блоки сетки при параллельной обработке. MGLET - это блочно-структурированный код для управления несколькими сетками, возникающими в результате распараллеливания (более подробно см. Manhart et al., 2001). Валидация кода моделирования была проведена в ходе различных исследований DNS и LES турбулентного потока в гладком канале (Manhart et al., 1998), а также разделения и повторного присоединения турбулентного потока пограничного слоя (Manhart and Friedrich, 2002).