**DNS и LES турбулентного потока в замкнутом по сечению канале с нанесенными полусферическими элементами шероховатости.**

Прямое численное моделирование (DNS) и моделирование больших вихрей (LES) были выполнены для полностью развитого турбулентного потока в каналах с гладкими стенками и стенками с полусферической шероховатостью элементы при числах Рейнольдса сдвига Res = 180 и 400 с целью изучения влияния этих элементов шероховатости на структуру пристеночного слоя и на коэффициент трения. Подходы LES и DNS были сначала проверены путем сравнения с существующими базами данных DNS для гладких стен. Затем было проведено параметрическое исследование полусферических элементов шероховатости, включая влияние числа Рейнольдса на сдвиг, нормированной высоты шероховатости (k + = 10–20) и относительного шага шероховатости (s + / k + = 2–6). Исследование чувствительности также включало влияние структуры распределения (регулярная квадратная решетка против случайной структуры) элементов шероховатости на стенах. Полусферические элементы шероховатости создают турбулентность, таким образом увеличивая коэффициент трения по отношению к случаю с гладкими стенками и вызывая смещение вниз профилей средней скорости. Моделирование показало, что коэффициент трения уменьшается с увеличением числа Рейнольдса и шага шероховатости, и сильно увеличивается с увеличением высоты шероховатости. Однако влияние распределения случайных элементов на коэффициент трения и средние скорости является слабым. Во всех случаях между внутренним слоем у стены существует четкий разрез, на который влияет наличие элементов шероховатости, и внешним слоем, который остается относительно незатронутым. Исследование показывает, что наличие элементов шероховатости этой формы локально способствует мгновенному движению потока в боковом направлении в слое стенки, вызывая передачу энергии от продольного напряжения Рейнольдса к боковому компоненту. Исследование также указывает на то, что когерентные структуры, развивающиеся в слое стенки, довольно похожи на гладкий случай, но поднимаются почти постоянным сдвигом стенок на единицу y + (10-15), что, что интересно, соответствует относительной шероховатости k + = 10.

**Введение**

Влияние шероховатости стены на структуру пограничного слоя стены всегда было предметом специальных исследований, начиная с пионерской работы Colebrook (1939), Nikuradse (1950). Имеется много литературы по однофазному турбулентному течению в каналах с крупными элементами шероховатости различной формы - см., Например, обзор экспериментальной работы, представленный в Jimenez (2004); однако мало что можно сказать о влиянии мелких полусферических элементов шероховатости, регулярно или случайным образом распределенных на стенке канала; ситуация, которая имеет отношение к различным энергетическим системам, таким как ископаемые котлы и ядерные реакторы, в которых пузырьки пара прикрепляются к стенке при переохлаждении потока с переохлаждением и эффективно ведут себя как маленькие (<100 лм) почти полусферические элементы шероховатости. 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.

Размер и распределение изученных здесь полусферических элементов шероховатости определяются ситуацией с переохлаждением потока в горячем топливном узле реактора с водой под давлением (PWR). Однако здесь нет намерения моделировать реальные пузырьки, только маленькие твердые полусферические элементы шероховатости.

Предпосылки и краткий обзор литературы приведены в разделе 2. Численная процедура описана в разделе 3. Исследования DNS и LES для гладкого потока в стенке канала и один типичный случай с полусферическими элементами шероховатости представлены в разделе 4. Параметрический анализ LES для полусферические элементы шероховатости представлены в Разделе 5. Выводы и рекомендации для будущей работы обсуждаются в Разделе 6. Проверка качества и решения LES представлена в Приложении.

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.

**Предпосылки**

Внедрение подходов моделирования высокой точности и все более мощных компьютеров позволило провести серию исследований DNS по полностью развитому потоку по грубым прямоугольным каналам с двумерными ребрами с подробными данными PIV (Krogstad et al., 1992, 2005) для модели Проверка. В большинстве этих исследований ребра были довольно большими, достигая до 20% от половины высоты канала. Влияние расстояния между ребрами было широко изучено с помощью DNS и LES (Leonardi and Castro, 2010; Miyake et al., 2001; Leonardi и др., 2003; Nagano et al., 2004; Ashrafian et al., 2004; Hanjalic and Launder, 1972), и привел к классификации поведения потока на основе отношения высоты к расстоянию между ребрами. Другое исследование было посвящено влиянию неравномерной высоты стержня (Nagano et al., 2004). Bailon-Cuba et al. (2009), Ikeda и Durbin (2007) сообщают о влиянии случайно распределенной высоты двухмерных элементов шероховатости. Трехмерные элементы шероховатости были также изучены с помощью DNS (Orlandi et al., 2006; Leonardi et al., 2003, 2007; Bhaganagar et al., 2004; Coceal и др., 2006), включая влияние числа Рейнольдса и расстояние между элементами.

Однако числовые данные для мелких элементов шероховатости ограничены. Численное исследование, представленное в этой статье, исследует полностью развитый турбулентный поток по малым полусферическим элементам шероховатости при большом числе Рейнольдса; здесь «маленький» означает, что размер элементов шероховатости имеет порядок пристеночного вязкого пограничного слоя, который, конечно, уменьшается при увеличении числа Рейнольдса. Полученные таким образом данные заполняют пробел между данными о гладких стенках и другими результатами с большой шероховатостью, которые имеются в литературе. Наличие высокопроизводительных вычислительных средств устраняет препятствие неадекватного разрешения мелких элементов шероховатости.

Взаимодействие между элементами шероховатости, прикрепленными к стене, и продольными вихрями изменяет пристенный слой по отношению к случаю потока с гладкой стенкой, для которого применяется обычный «закон стены»:

где U + и y + - нормализованная шкала скорости и длины (стенка турбулентности) соответственно, j - постоянная фон Кармана (0,4), а A - постоянная гладкой стенки (A 5.1 для потока в трубе). Символ + указывает на нормализацию. Скорость нормализуется скоростью сдвига us, а нормализованная шкала длин определяется как yys u (m - кинематическая вязкость). В режиме грубой стены профиль скорости во внутреннем слое будет изменяться в соответствии со следующим уравнением:

является модификацией постоянной гладкой стенки из-за эффектов шероховатости и часто называется функцией шероховатости. k - нормальная для стены высота элементов шероховатости в метрах. Число Рейнольдса сдвига задается как: Res hu ms, где h - половина высоты канала. Также коэффициент трения определяется как: где Ub - объемная скорость жидкости.

**Численная процедура**

Трехмерное моделирование DNS и LES, представленные здесь, были выполнены с использованием конечного объема CFD / CMFD-кода TransAT. Использовалась декартова сетка, размещенная в одном месте, и решались уравнения несжимаемого Навье-Стокса. Используемый здесь подход состоит в том, чтобы представлять сплошные препятствия в декартовой сетке (а не использовать сетку связанную с поверхностью тела). Используемый метод (Labois et al., 2010) является специфическим вариантом метода Пескина с погруженной границей (Peskin, 1977; Mittal and Iaccarino, 2005). В настоящей технике погруженной поверхности (IST) твердый объект захватывается в декартовой сетке с использованием функции установки уровня; где положительные значения обозначают жидкую область, отрицательные значения идентифицируют твердую область, и поверхность стенки неявно представлена набором нулевого уровня.

Функция индикатора области жидкости (полученная из функции установки уровня) плавно изменяется по всей поверхности стенки с поддержкой двух ячеек на каждой стороне границы раздела жидкость-твердое вещество. Условие скольжения на стенке накладывается через член релаксации, который действует как распределенный сток импульса, уменьшая скорость жидкости, когда индикаторная функция стремится к нулю (Beckermann and et al., 1999).

Сетка была локально уточнена в областях, представляющих интерес, а именно в области непосредственно рядом со стенками, простирающимися в направлении нормали к стенке за концом элементов шероховатости и вплоть до буферного слоя. В этих регионах сетка имела два слоя ячеек-призраков, обеспечивающих высокое разрешение элементов шероховатости (10 точек сетки на радиус элемента). Затем сетчатый домен был разложен на количество блоков, равное количеству процессоров, которые будут использоваться для расчета. Передача информации между соседними блоками осуществлялась с использованием распараллеливания MPI. Все моделирования проводились с использованием центральной разностной схемы 2-го порядка для дискретизации конвективных потоков. Явная схема Рунге-Кутты 3-го порядка использовалась для интегрирования по времени. Шаг по времени был адаптивным и ограничивался числом Куранта, фиксированным между 0,1 и 0,3, чтобы гарантировать стабильность моделирования. Для связи давления и скорости использовался алгоритм SIMPLEC. GMRES с предварительной SIP-обработкой, дополненный использованием параллельной библиотеки решателя PETSc, был использован для решателя давления.

При моделировании LES модель подсеток WALE (Nicoud and Ducros, 1999) использовалась для учета неразрешенной турбулентности в подсеточных масштабах. Это модель с нулевым уравнением с характеристиками, аналогичными модели Смагоринского (Smagorinsky, 1963), хотя и включает в себя скорость изменения завихренности в определении вязкости вихря, помимо тензора скорости деформации.

Все симуляции были настроены и постобработаны на локальном 12-ядерном компьютере с 64 процессорами и запущены на сотнях или тысячах процессоров с поддержкой MPI в Oak Ridge Leadership Computing Facility Jaguar, теперь называемом Titan.

**Общая настройка симуляции**

Во всех симуляциях домен состоял из декартовой коробки (рис. 1), размер которой был выбран так, чтобы включать в себя самые большие вихри в потоке, и таким образом, чтобы турбулентные вихри не коррелировали. Таким образом, для гладкого обтекания стенки декартова коробка имела размеры L x = 2ph, Ly = 2h и Lz = ph, где h - высота полуканала (направление стенки-нормали). h был постоянным во всех наших симуляциях. Размеры в продольном и продольном направлениях блока немного варьировались между симуляциями, чтобы учесть различное количество элементов шероховатости или увеличение или уменьшение расстояния между элементами шероховатости. Поскольку полностью развитый поток турбулентного канала является однородным в продольном и продольном направлениях, x и z соответственно, периодические граничные условия могут применяться в этих направлениях. Граничные условия против скольжения применялись как на верхней, так и на нижней горизонтальных плоскостях канала, а также на поверхности элементов шероховатости.