

АТМОСФЕРНЫЙ ПОТОК ЧЕРЕЗ РЕЛЬЕФ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНЫХ RANS / LES

М.Ч. Осконбаев, Ошский государственный университет, доцент кафедры экспериментальной и теоретической физики, к.ф.-м.н., Кыргызская Республика, г.Ош, ул.Ленина-331. o_manas@mail.ru

Аннотация: Атмосферный поток через рельеф с использованием гибридных RANS / LES на примере горы Сулейман.

Ключевые слова: Сложный рельеф местности, CFD, турбулентная модель, симуляция, LES, RANS, OpenFOAM.

ATMOSPHERIC FLOW THROUGH THE RELIEF USING THE HYBRID RANS / LES

M.Ch. Oskonbaev, Osh State University, Associate Professor of the Department of Experimental and Theoretical Physics, Ph.D., Kyrgyz Republic, Osh, Lenin-331. o_manas@mail.ru

Annotation: Atmospheric flow through the terrain using hybrid RANS / LES as an example of Suleiman mountain.

Keyword: Complex terrain, CFD, turbulence model, simulation, LES, RANS, OpenFOAM

Совокупность природных явлений, а также проблемы гидравлики, акустики, физиологии кровообращения, организации химических и технологических процессов

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

вследствие незначительности характерных скоростей можно моделировать на основе несжимаемой вязкой жидкости, описываемой уравнениями Навье-Стокса [1]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right)$$

Для инженеров-ветров для определения нагрузки на ветряные турбины важна точная информация о ветре. С повышением уровня использования все более сложных объектов для ветропарков, местные явления ветра можно ожидать значительно увеличивают конструктивные нагрузки на ветряные турбины. При моделировании ветра над рельефом с использованием вычислительной гидродинамики (ВГД, далее CFD) принято решать несжимаемые уравнения RANS (Уравнения Рейнольдса — уравнения Навье — Стокса (уравнения движения вязкой жидкости), осреднённые по Рейнольдсу, далее RANS.) вместе с k-ε-моделью турбулентности, используя код конечного объема. Решение уравнения RANS дает информацию о среднем ветре и среднем уровне турбулентности кинетической энергии в интересующем месте. Однако для многих сложных мест присущие нестационарные особенности потока должны быть смоделированы для обеспечения надежных прогнозов. Для обработки сложного ландшафта в этой статье предлагается использовать Метод Крупных Вихрей (МКВ, далее LES). LES решает турбулентные структуры больше, чем конечные объемы и фиксирует неустойчивость потока.

Основным недостатком использования LES по сравнению с RANS является увеличение вычислительных затрат. Для больших количеств Рейнольдса количество точек вычислительной сетки, необходимых для разрешения околостенных турбулентных структур с использованием LES, просто слишком велико. Таким образом, сокращение CFD-затрат на LES стеновых потоков является серьезной проблемой в CFD. Более того, чтобы усложнить ситуацию, стенки потоков атмосферного пограничного слоя не являются гладкими, но состоят из элементов шероховатости. Невозможно произвести вычислительное сцепление, которое разрешает все отдельные элементы шероховатости. В конечном счете, для облегчения требования к разрешению на стенку и решения проблемы шероховатой стены необходимы приближенные граничные условия. Мы представляем новую модель LES, основанную на высокой модели Рейнольдса k - ε RANS [2], найденной в большинстве коммерческих CFD-решателей. Для уменьшения вычислительной стоимости и возможности моделирования потока по шероховатым поверхностям предлагаемая модель LES решает уравнения RANS вблизи поверхности и переключается на LES выше. Таким образом, пристенный слой RANS действует как модель стены для внешнего потока, обрабатываемого LES. Одним из преимуществ этого подхода является то, что функция стены, встроенная в модель k - ε RANS, может использоваться непосредственно для моделирования шероховатой поверхности. Предложенную модель можно запустить как чистую RANS или как LES с функцией стены в зависимости от необходимого уровня детализации. Чтобы исследовать возможности новой модели LES для потока по рельефу, мы моделируем поток над горм Сулейман. Горы Сулейман был выбран из-за имеющихся экспериментальных измерений и потому, что он был широко смоделирован другими исследователями.

Цель этой статьи - дать представление о возможности использования LES для ветра над естественным ландшафтом.

Методика моделирования

Трудность проверки моделей, предназначенных для прогнозирования ветра над рельефом, заключается в тщательном документировании экспериментальных измерений ветра над естественным рельефом.

Решатель CFD

Многоблочные объекты позволяют проводить большие параллельные вычисления и обмен информацией между процессорами обрабатываются с помощью интерфейса передачи сообщений. Код сформулирован в общих криволинейных координатах, которые могут точно описывать ландшафт и в коде используются нешаблонные сетки со всеми переменными, хранящимися в центрах ячеек. Во всех симуляциях PISO алгоритм [3] был использован для решения системы уравнений и развязки давления / скорости применяя метод интерполяции Рунге / Коу [4]. Решатель ТДМА (трехдиагональный матричный алгоритм) используется в изменяющихся направлениях для решения уравнений переноса, а раствор давления ускоряется с использованием многосеточного метода. Решение продвигается во времени с использованием итерационного метода временного шага второго порядка где глобальный временной шаг Δt выбирается так, чтобы дать максимальное значение CFL-номера (Курант-Фридрих-Леви) не более 0,25 ($\Delta t = 0,3$ с).

Гибридная модель RANS / LES

Поскольку слишком дорого стоит подсчет и решение всего диапазона турбулентных масштабов, найденных в атмосферических потоках, важны наборы уравнений потока, которые могут быть решаемы численно. Обычно используются два подхода. Традиционный подход RANS обеспечивает усредненное по времени описание потока, в то время как пространственный фильтр, применяемый для LES, дает зависящее от времени решение турбулентных структур чем интервал вычислительной сетки. Уравнения RANS получены из standard NS-уравнений путем разложения переменных в усредненные по времени и изменяющиеся компоненты по усреднению по времени. Хотя усреднение по времени выполняется, переходный член NS-уравнений сохраняется, что делает RANS способным предсказать переходные при вступлении в крупную шкалу времени по сравнению со временем усреднения. Это иногда обозначается URANS (Непостоянный RANS - Unsteady RANS), но здесь просто обозначается RANS.

Идея LES заключается в том, чтобы применить пространственный фильтр к NS-уравнениям, тем самым получив LES-уравнения, которые определяют турбулентные структуры, большие, чем применяемые фильтры. Вместо явного применения фильтра к NS-уравнению конечно-объемная дискретизация уравнений потока на числовой сетке интерпретируется как неявный фильтр, связанный с численным разрешением - разрешаются только турбулентные масштабы, большие, чем интервал между числами. Чтобы иметь возможность сравнивать поля ветра от моделирования RANS с теми, которые получены из сильно неустойчивых LES, представлены только усредненные результаты ансамбля. Они получены путем усреднения по времени статистически стационарные ветровые поля RANS и LES в течение длительных периодов времени.

В результате усреднения по времени в RANS и фильтрации в LES создается турбулентный стресс-период, что необходимо смоделировать. Управляющие уравнения для RANS и LES на самом деле идентичны, но для двух подходов необходимо моделировать турбулентный стресс-период для увеличения объема. Высокий номер Рейнольдса $k - \epsilon$ Модель RANS обрабатывает шероховатую поверхность земли с помощью стеновой функции (классического логарифмического профиля ветра), которая связывает поверхностное напряжение шероховатой стенки с тангенциальной скоростью около стенки.

Для разработки модели LES для моделирования рельефа модель $k - \epsilon$ RANS используется как начальная точка. Поскольку модель LES должна обрабатывать поток по шероховатым поверхностям, функция стены используемый для RANS также необходим для LES. Мы применяем подход, при котором пристенный поток решается с помощью RANS, но смешивается с LES от стены. Таким образом, функция стены, встроенная в модель $k - \epsilon$ RANS, может быть использована напрямую, а вычислительные затраты сокращаются, так как в области RANS может использоваться грубая вычислительная сетка. Этот подход похож на

DES (моделирование с одиночным вихрем) [5], но также может использоваться для грубых поверхностных потоков. Что еще более важно, когда DES предназначен только для обработки разделенных областей потока с помощью LES, идея предложенной модели турбулентности состоит в том, чтобы обрабатывать большую часть потока с использованием LES и иметь только тонкий слой RANS вблизи стен, которые выступают в качестве настенной модели для внешнего течения. Переключение между RANS и LES выполняется путем изменения характерной длины шкалы в вихревую вязкость. Для RANS шкала характерной длины представляет все масштабы турбулентного потока. Для LES большие турбулентные структуры разрешены, поэтому масштаб длины представляет собой небольшие нерешенные структуры, которые масштабируются с интервалом вычислительной сетки.

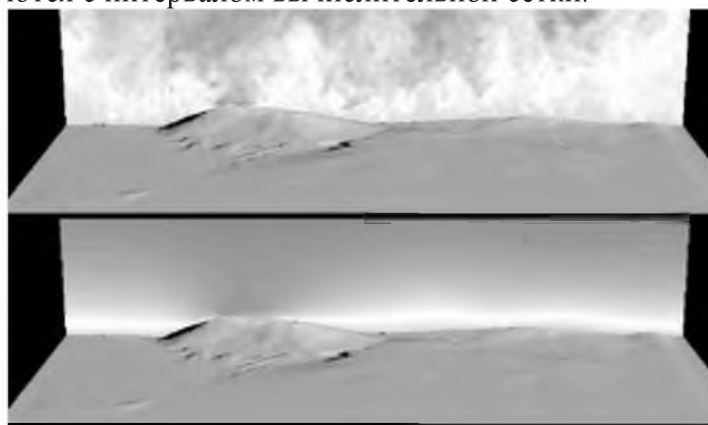


Рисунок 1: Плоскость поперечного сечения, показывающая мгновенные контуры скорости ветра для LES (верхняя) и RANS (снизу), которые видны из восходящего местоположения.

После [6] диссипативный член уравнения k-переноса модифицирован для включения новых шкал длины, /,

$$\bar{l} = \min(l_{RANS}, l_{LES}) = \min\left(\frac{\bar{k}^{3/2}}{\bar{\epsilon}}, C_{\Delta}\Delta\right) \quad (1)$$

где Δ - локальное максимальное расстояние между сетками по трем направлениям, а C_{Δ} - модельная константа. новая шкала длины, l , автоматически переключается между RANS и LES. У стены l_{RANS} меньше, чем создается l_{LES} и область RANS. Вдали от стены l_{LES} является наименьшим, и модель переключается на LES. Так как турбулентные структуры из области LES смешиваются в области RANS, то определенная высота переключателя определяется как часть решения. Однако для представленной симуляции переключение происходит на высоте около 6 м. Поскольку эта высота относительно низкая по сравнению с высотой горы, представленная модель RANS / LES можно назвать LES с настенной моделью. Следует отметить, что вихревая вязкость по-прежнему вычисляется с использованием как k , так и ϵ , поэтому уравнения $k - \epsilon$ должны быть решены во всей области потока как для LES, так и для RANS.

Константы модели $k - \epsilon$ настраиваются для обеспечения того же уровня турбулентной кинетической энергии в исходном местоположении, что и в измерениях. Интенсивность турбулентности ($I = \sqrt{k} / u$) 10 м над землей при RS была измерена до 0,12. Этот уровень турбулентности должен воспроизводиться как для чистого моделирования RANS, так и для ближнего уровня RANS LES. Используя уравнение 4 (см. Ниже), найдено, что $C^{\wedge} = 0,11$. Кроме того, другие константы $k - \epsilon$ необходимо модифицировать из их стандартного значения,

где $K = 0,4$ - константа фон Кармана, $C_{t2} = 1,92$, $a_e = 1,30$ и $C_s = 0,144$. Используемые константы модели суммированы в таблице 1.

Константы модели $k - \epsilon$ настраиваются для обеспечения того же уровня турбулентной кинетической энергии в исходном местоположении, что и в измерениях. Интенсивность турбулентности ($I = \sqrt{k} / u$) 10 м над землей при RS была измерена до 0,12. Этот уровень турбулентности должен воспроизводиться как для чистого моделирования RANS, так и для ближнего уровня RANS LES. Используя уравнение 4 (см. Ниже), найдено, что $C_\mu = 0,11$. Кроме того, другие константы $k - \epsilon$ необходимо модифицировать из их стандартного значения,

$$C_{\epsilon 1} = C_{\epsilon 2} - \frac{\kappa^2}{C_\mu^{1/2} \sigma_\epsilon}, \quad (2)$$

$$C_\Delta = C_s C_\mu^{-3/4} \frac{C_{\epsilon 1}}{C_{\epsilon 2}} \quad (3)$$

где $k = 0,4$ - константа фон Кармана, $C_{\epsilon 2} = 1,92$, $a_e = 1,30$ и $C_s = 0,144$ (см. [1]). Используемые константы модели суммированы в таблице 1.

Таблица 1: Константы модели $k - \epsilon$ для RANS и LES

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ	C_Δ	κ
0.11	1.55	1.92	1.00	1.30	0.61	0.40

Вычислительная сетка

Гора представляет собой пятиглавый известковый останец, вытянутый с запада на восток. Длина его более 1140 м, ширина — 560 м. Она издревле имела сакральное значение, о чём свидетельствуют сохранившиеся петроглифы. На склоне горы устроен музей её истории. До XVI века гора называлась Бара-Кух [7], затем, вплоть до XX века, — Тахты-Сулейман. Для обеспечения буферной зоны между гором Сулейман и вычислительным выходом длина домена увеличивается до 8,8 км за счет дополнительных 48 точек сетки. Высота первой ячейки стенок сетки равна длине шероховатости, $z_0 = 0,03$ м. С этой высоты сетка растягивается по вертикали, используя трехмерный гиперболический сетчатый генератор на основе, до высоты ($z \ll 150$ м), из которой достигаются почти кубические ячейки сетки ($A = 23,3$ м). 40 ячеек используются для первых 150 м для захвата больших приповерхностных градиентов скорости. Общая высота вычислительной области составляет $H = 1140$ м и $(288 \times 240 \times 96)$ ячейки сетки используются (см. Рис.2).

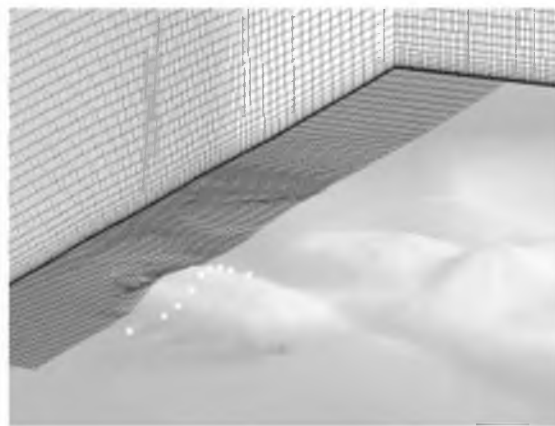


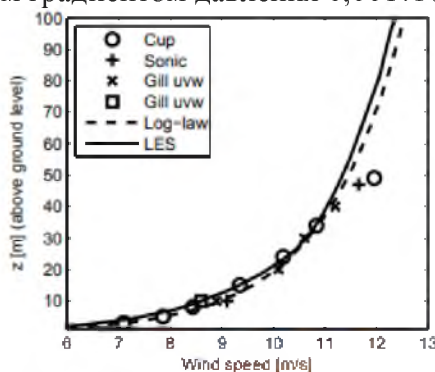
Рисунок 2: Вычислительная сетка. Отображается только каждая вторая точка сетки. Белыми точками обозначают измерительные станции, расположенные вдоль линии A.

В верхней части вычислительной области используется граничное условие симметрии (свободная от трения) ($du / dz = dv / dz = 0, w = 0$). Эффект условия симметрии на поток заключается в том, чтобы препятствовать турбулентным нормальным движениям при увеличении тангенциальных движений - поэтому условие симметрии напоминает инверсионный слой (слой с ростом температуры с высотой в верхней части атмосферного пограничного слоя). Поперечные горизонтальные границы задаются как периодические, а граничное условие Неймана (нулевой нормальный градиент) используется на выходе.

Чтобы смоделировать ветер над горами Сулейман, «невозмущенный» профиль ветра, измеренный в RS, используется в качестве входных данных для моделирования. Для моделирования RANS средние значения скорости (u), турбулентной кинетической энергии (k) и диссипация турбулентной кинетической энергии (ϵ) указаны на границе входа,

$$\langle u \rangle = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}, \quad \langle k \rangle = \frac{u_*^2}{C_\mu^{1/2}}, \quad \langle \epsilon \rangle = \frac{u_*^3}{\kappa z} \quad (4)$$

где $u_* = 0,618 \text{ms}^{-1}$. Чтобы обеспечить реалистичный турбулентный приток для LES, выполняется отдельное моделирование, предшествующее с поточно-периодическими граничными условиями и плоской рельефом. Кориолисовы силы включены ($f_c = 10^{-4} \text{s}^{-1}$), а поток управляется постоянным градиентом давления $0,0017 \text{N m}^{-3}$.



На рисунке 3 показан начальный профиль ветра для LES и логарифмический профиль используется для RANS по сравнению с измерениями, сделанными в контрольном местоположении Сулейман горы.

Как видно, измеренный ветер хорошо согласуется с профилями ветра, используемыми для моделирования. Интенсивность турбулентности ($\lambda / k / u_{10m}$) для RANS задано значение 0.12 - равно экспериментальному значению. Для LES имитированное значение составляет около 0,16, то есть немного выше, чем в эксперименте.

Результаты

На рисунке 5 создается впечатление разрешения LES перед усреднением. Это показывает пятиминутные временные ряды потока и вертикальной флуктуации скорости, взятые на вершине гора 10 м.

Средние по времени поля скорости для RANS и LES сначала сравниваются с измерениями. Чтобы обеспечить сравнение, определяется коэффициент дробного увеличения скорости ветра,

$$\Delta S = \frac{\langle u(z') \rangle - \langle u_{ref}(z') \rangle}{\langle u_{ref}(z') \rangle} \quad (5)$$

где z^1 - локальная высота над рельефом и $(u_{ref}(z^1))$ - эталонная скорость. Эталонная скорость равна взятым в RS для измерений и на вычислительном входе для моделирования (см. рисунок 4). На рисунке 6 показано наблюдаемое и смоделированное ускорение на высоте 10 м над землей вдоль линии А. На ветровой подошвенная сторона холма RANS и LES дают аналогичные результаты. Ускорение вершины холма хорошо захвачено LES и немного недооценивается RANS. Основное различие в расчетном ускорении наблюдается на левая сторона холма. Здесь RANS немного переоценивает ускорение, в то время как LES недооценивает. причина этого несоответствия связана с сложным потоком на стороне.

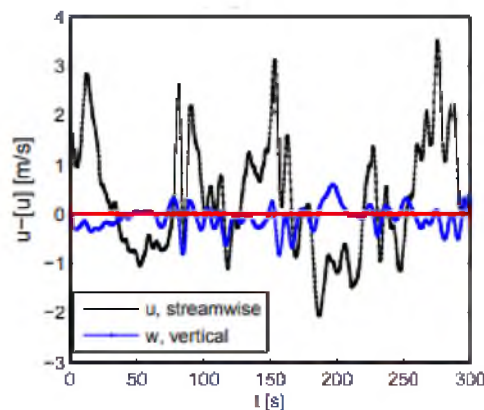


Рисунок 4: Временные ряды потоковых и вертикальных колебаний скорости от моделирования LES. Временные ряды взяты на вершине гора (10 м над уровнем моря).

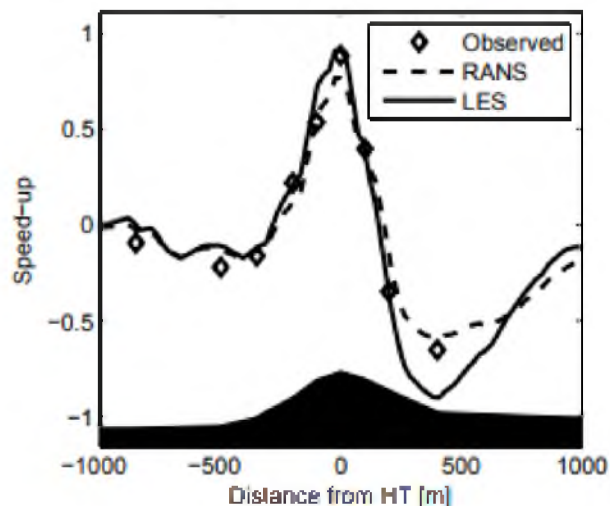


Рисунок 5: Сравнение наблюдаемого ускорения скорости вдоль линии А с моделированием LES и RANS. Пунктирная линия показывает результат RANS, а полная строка - для LES. Измерения отмечены бриллиантами.

На рисунке 5 показано наблюдаемое и смоделированное ускорение на высоте 10 м над землей вдоль линии А. На наветренной стороне гора RANS и LES дают аналогичные результаты. Ускорение вершины гора хорошо зафиксировано LES и немного недооценено RANS. Основное различие в расчетном ускорении наблюдается на подветренной стороне гора.

Здесь RANS слегка переоценивает ускорение, в то время как LES недооценивает. Причина этого несоответствия связана со сложным потоком на подветренной стороне.

RANS переоценивает ускорение, потому что в нем полностью отсутствует разделение, а LES недооценивает, потому что зона разделения завышена. Средняя область обратного потока для LES показана на рисунке 6.

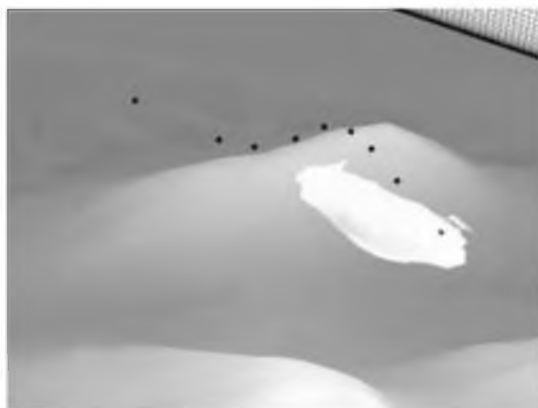


Рисунок 6: Область обратного потока со стороны подветренной стороны. Контур нулевой u -скорости (направление притока) показан.

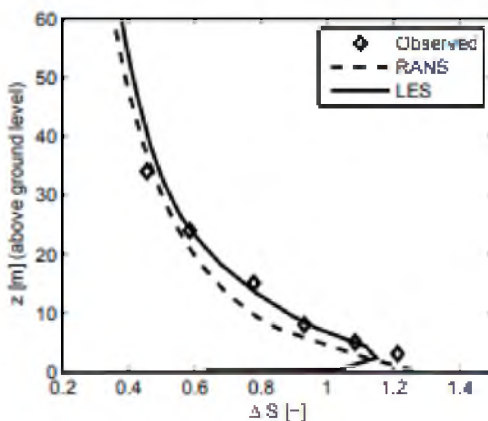


Рисунок 7: Ускорение скорости на вершине гора.

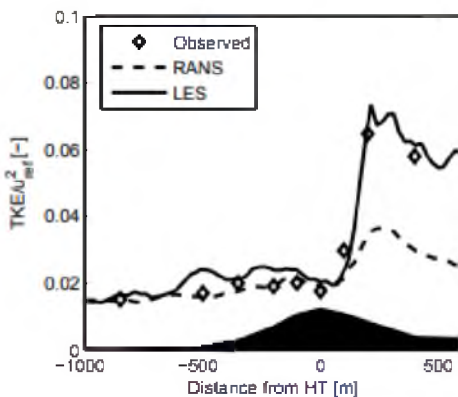


Рисунок 8: Турбулентная кинетическая энергия вдоль линии А.

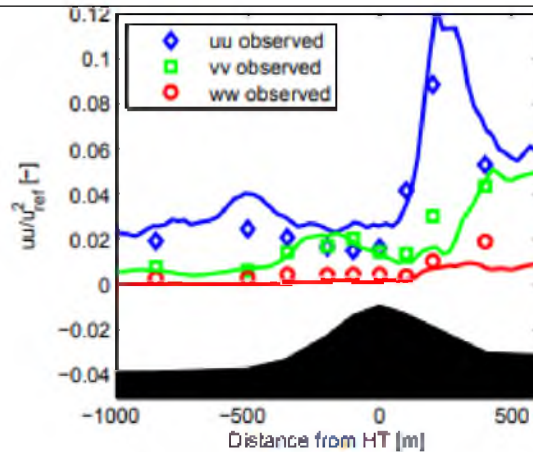


Рисунок 9: Компоненты турбулентности LES вдоль линии A.

Здесь это видно, что конечная точка измерения находится внутри области рециркуляции. Причина преувеличенной зоны разделения может быть связана с выбранным значением шероховатости поверхности, однако измеренное значение интенсивности турбулентности предполагает, что разделение должно присутствовать - по крайней мере, прерывисто. Ускорение вершины холма показано на рисунке 8 и хорошо прогнозируется. Ускорение LES слегка завышено на 40м. Это может быть связано с эталонной скоростью (рисунок 4), что ниже, чем измеряется на этой высоте.

Заключение

В этой статье представлен метод, с помощью которого LES можно использовать для моделирования ветра над естественной местностью. Поскольку метод LES является вычислительно дорогостоящим (даже с предложенной моделью стены), он должен в первую очередь использоваться для сложной местности, где присуща неустойчивость особенности, которые доминируют в потоке, должны быть точно отражены. Представленная модель основана на стандартной модели с высоким числом Рейнольдса $k-\epsilon$ ANS RANS, используемой в большинстве коммерческих CFD-решателей. Изменяя турбулентную шкалу длины, встроенную в модель RANS, создается модель LES. Новая модель турбулентности может работать в режиме RANS или LES в зависимости от необходимого уровня детализации. Модель LES была протестирована путем моделирования потока над горами Сулейман. Поскольку проект горами Сулейман предусматривает измерения турбулентности, это хороший тестовый пример для проверки моделей турбулентности. Результаты моделирования показали, что интенсивность турбулентности и средняя скорость были хорошо зафиксированы на стороне ветра как для RANS, так и для LES. Однако боковой поток подветренной стороны было труднее уловить. Как правило, модели RANS не могут уловить это разделение потока, что приводит к слишком малым скоростным и турбулентным прогнозам - этот результат был воспроизведен с помощью модели с $k-\epsilon$ RANS. Новая модель LES была способна захватить разделение потока, хотя и не прерывисто, как показывают измерения. В результате ускорение скорости было непредсказуемым, но интенсивность турбулентности была хорошо предсказана. Использование LES для моделирования ветра в естественной местности было показано возможным. Хотя хорошие результаты были достигнуты, которые свидетельствует согласие с экспериментальными данными.

Литература:

- [1]. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Edinburg (2007).
 [2]. В.Е. Launder and D.B. Spalding. The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Meths. Appl. Mech. Eng.*, 3:269-289, 1974.

[3]. R.I. Issa. Solution of implicitly discretized fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*, 62:40-65, 1986.

[4]. C.M. Rhie. *A numerical study of the flow past an isolated airfoil with separation*. Ph.d. thesis, University of Illinois, 1981.

[5]. P.R. Spalart, W.-H. Jou, M. Strelets, and S.R. Allmaras. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. *1st AFOSR Int. Symp. Eng. Turb. Modelling and Measurements, May 24-26, Corsica, 1997*.

[6]. A. Travin, M. Shur, and M. Strelets. Physical and numerical upgrades in detached-eddy simulation of complex turbulent flows. *412 EU-ROMECH colloquium on LES of complex transitional and turbulent flows, Munich, Oct. 2000*.

[7]. Захириддин Бабур. Бабур – Намэ. Баку. 2011. С.13