

Моделирование энергетических характеристик пограничного слоя атмосферы

С. Ю. Соловьев, Е. Ф. Храпунов

Крыловский государственный научный центр,
Российская Федерация, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44

Для цитирования: *Соловьев С. Ю., Храпунов Е. Ф.* Моделирование энергетических характеристик пограничного слоя атмосферы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2018. Т. 5 (63). Вып. 4. С. 689–700. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2018.415>

В работе приведены отдельные экспериментальные данные по моделированию пограничного слоя атмосферы в Ландшафтной аэродинамической трубе — новой экспериментальной установке ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Моделирование пограничного слоя атмосферы происходит за счет длинной рабочей части аэродинамической трубы и установки в ней вихрегенераторов в виде конусов и элементов дискретной шероховатости в виде призм. На примере моделирования профиля средней и пульсационной составляющих скорости показана возможность воспроизведения не только средних, но и основных энергетических характеристик пограничного слоя атмосферы с приемлемой для инженерных задач точностью. Корректность моделирования средних характеристик устанавливалась путем сопоставления результатов эксперимента с данными, приведенными в руководящих документах. Корректность моделирования энергетических характеристик обеспечивается за счет согласования с известными энергетическими соотношениями: законом « $-5/3$ », аппроксимирующими зависимостями Давенпорта, Кармана, Липмана.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, физическое моделирование, энергетический спектр турбулентности, аэродинамическая труба.

1. Введение. В последние 10–15 лет в России произошел серьезный рост строительства уникальных архитектурных объектов: высотные здания и небоскребы, большепролетные мосты, олимпийские спортивные объекты, стадионы к чемпионату мира по футболу, аэропорты. При проектировании этих сложных конструкций учет ветровой и снеговой нагрузки начинает играть первостепенную роль. Для корректного определения этих нагрузок необходимо проведение аэродинамических исследований в специализированных аэродинамических трубах, которые позволяют моделировать пограничный слой атмосферы (ПСА). Данное требование сформулировано в российских и зарубежных руководящих документах по учету нагрузок и воздействий [1, 2].

В практике проектирования наибольший интерес представляет прилегающий к земле ПСА до высоты 1000 метров, так как именно в этом слое свойства ветра определяются шероховатостью и тепловыми воздействиями земной поверхности. В настоящее время благодаря метеорологическим наблюдениям основные характеристики ПСА, важные для учета воздействия ветра на сооружение, изучены и получены их аппроксимирующие зависимости для высот до 500 метров. Основной задачей

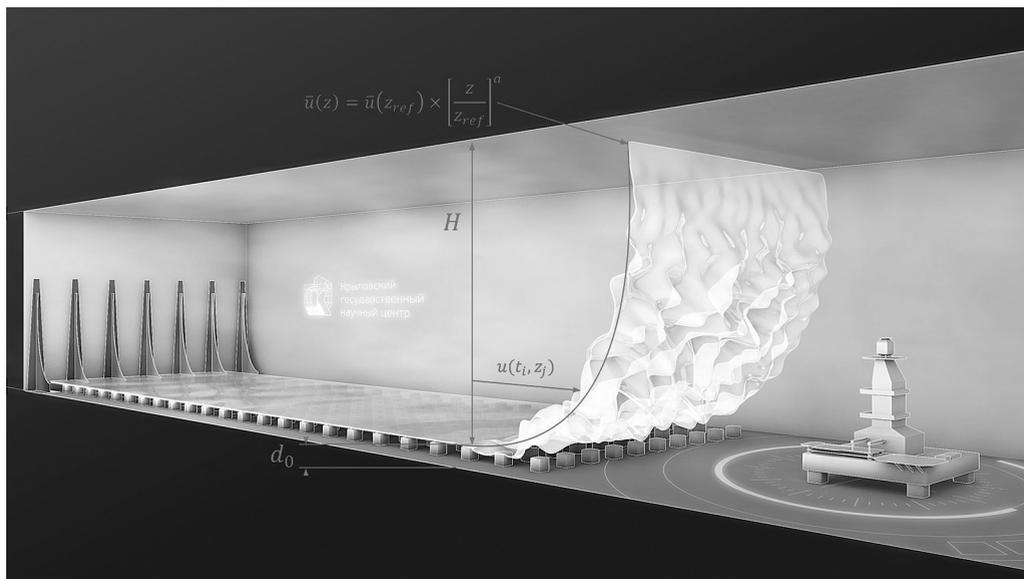


Рис. 1. Схема моделирования пограничного слоя атмосферы в рабочей части специализированной аэродинамической трубы.

перед исследователями, которые определяют ветровую нагрузку для конкретного проекта сооружения, является воспроизведение этих основных характеристик ПСА в рабочей части аэродинамической трубы во время испытаний модели сооружения (рис. 1). В большинстве случаев высота моделируемого в аэродинамической трубе ПСА составляет не более 300 метров, так как этого вполне достаточно для большинства высотных зданий. В случае аэродинамических исследований небоскребов, высота которых может достигать 800 метров, проводятся дополнительные исследования и обоснования.

В любом случае моделирование ПСА в лабораторных условиях накладывает ряд требований на характеристики рабочей части аэродинамической трубы и требует специальных методик и технологий. Конечной целью работ по данному направлению является разработка технологии корректного моделирования характеристик ПСА (профиль средней скорости, профиль пульсационной составляющей, энергетический спектр, масштабы турбулентности) в специализированной аэродинамической трубе.

В данной работе приводятся отдельные результаты по экспериментальному моделированию средних и энергетических характеристик ПСА для типа местности с малой аэродинамической шероховатостью (тип I в классификации [2]). Указанные исследования проводились в Ландшафтной аэродинамической трубе ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в рамках первых пуско-наладочных работ.

2. Теоретические предпосылки. Большинство течений, представляющих значительный интерес в вопросах проектирования зданий и сооружений, являются турбулентными. При этом дать полное и корректное определение турбулентному течению весьма непросто по причине большого разнообразия таких потоков. Считается, что основными особенностями турбулентности являются трехмерность, нестационарность и хаотичность [3]. Именно хаотичность протекающих в жидкостях про-

цессов не позволяет проводить точный анализ физических величин, точно предсказывать их поведение в каждый момент времени. Практическая важность понимания процессов турбулентности привела к возникновению большого числа упрощенных гипотез касательно структуры потока. Так, например, можно выделить гипотезу о замороженной турбулентности Тэйлора [4], идею о каскадном переносе энергии Колмогорова [5]. И та и другая гипотезы позволяют анализировать течение с приемлемой точностью, однако общеизвестны случаи о нарушении их обеих [3, 6, 7].

В современных представлениях можно говорить о турбулентности как о наборе существенно разномасштабных вихрей, для описания взаимодействия которых используется математический аппарат теории вероятности, а именно представления о среднем, среднеквадратичном, а также о моментах более высокого порядка. Поскольку турбулентность представляется в виде разномасштабных вихрей, интерес также представляют размеры этих вихрей (пространственные масштабы турбулентности), время жизни вихрей (временные масштабы турбулентности), распределение общей энергии турбулентности по совокупности этих вихрей (энергетический спектр турбулентности). Под временем жизни вихря здесь и далее будем понимать время сохранения его индивидуальности.

Несмотря на растущие аппаратные мощности и постоянно развивающиеся алгоритмы вычислительной гидродинамики, источником основной информации о структуре турбулентности по-прежнему является эксперимент [8]. Достаточно обратить внимание на наличие большого количества полуэмпирических поправок к всевозможным моделям турбулентности для подтверждения этого факта. Что касается физического моделирования, то современный уровень развития методов экспериментальной диагностики потоков позволяет получать данные с достаточной степенью пространственно-временного разрешения для определения всевозможных параметров потока.

Большое внимание при этом следует уделять принципам моделирования натуральных условий. Пространственные масштабы, наблюдающиеся в атмосферных пограничных слоях, могут достигать сотен метров, а исследуемые временные масштабы — часы, дни, недели [9, 10]. Моделирование подобных процессов в лабораторных условиях требует специальных методик и технологий. Суть большинства из этих методик сводится к необходимости корректно моделировать распределение средней скорости по высоте слоя, интенсивности турбулентности, а также энергетические характеристики потока, описываемые, например, энергетическими спектрами. В настоящее время известно достаточное количество аппроксимирующих зависимостей для всех вышперечисленных характеристик, полученных в процессе натуральных исследований: степенная зависимость для изменения средней скорости по высоте, более сложные зависимости для интенсивности турбулентности и энергетических спектров. Основная задача сводится к корректному воспроизведению этих характеристик в процессе аэродинамических исследований.

3. Описание экспериментального стенда и метода измерений.

3.1. Описание экспериментального стенда. Ландшафтная аэродинамическая труба (ЛАТ) — это двухуровневая установка замкнутого типа с закрытой рабочей частью (рис. 2). На втором уровне располагаются семь импеллеров, которые осуществляют движение воздуха по замкнутому контуру. Практически весь первый уровень — это рабочая часть аэродинамической трубы. Главными особенностями ЛАТ являются размеры рабочей части. Ее длина составляет 18 метров, что позволяет моделировать приземный слой атмосферы, в котором профиль скорости ветра и

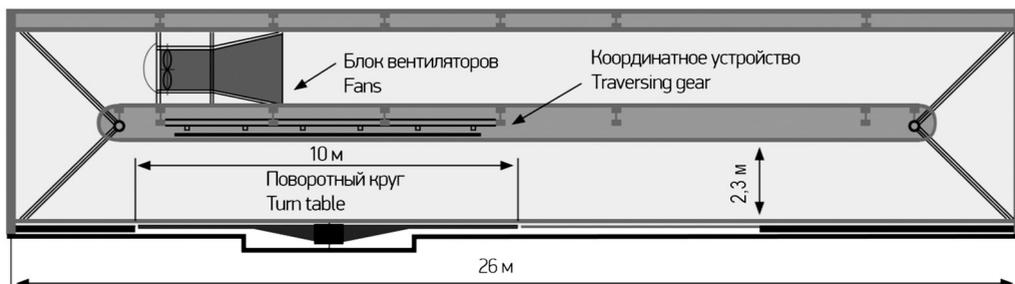


Рис. 2. Схема ландшафтной аэродинамической трубы. Продольный разрез.

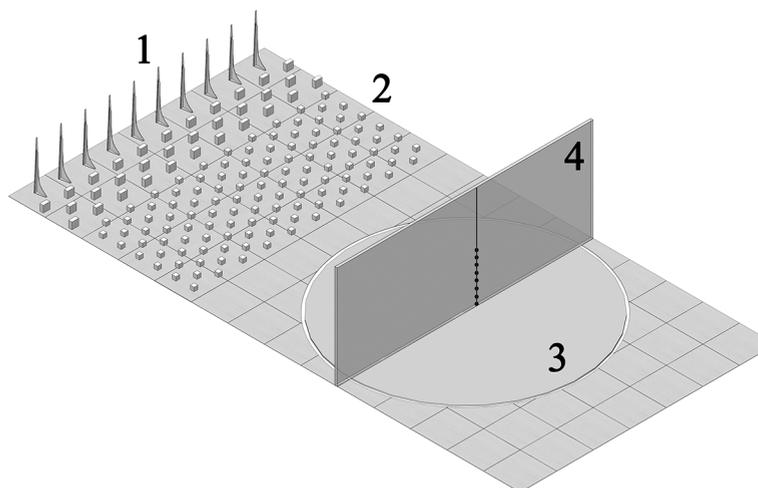


Рис. 3. Схема области измерения в рабочей части аэродинамической трубы: 1, 2 — дискретная шероховатость в виде конусов и призм, 3 — поворотный круг, 4 — плоскость измерений с отмеченными точками измерений.

характеристики турбулентности изменяются в зависимости от высоты. Вторая особенность — это ширина рабочей части 11 метров, которая необходима для исследований моделей в крупном масштабе с хорошей детализацией. Это особенно важно для получения корректных данных для мостов, портов и высотных зданий, где требуется воспроизводить окружающий ландшафт местности и прилегающую застройку. В полу аэродинамической трубы имеется поворотный круг, на котором размещается модель. За счет его вращения обеспечивается моделирование всех возможных направлений ветра с точностью 0,1 (одна десятая) градуса. На потолке установлено прецизионное координатное устройство, которое позволяет перемещать датчики в любую точку рабочей части с точностью 0,5 мм по всем трем координатам. Основные параметры экспериментальной установки:

- сечение рабочего участка — прямоугольник $11 \times 2,3$ м,
- длина рабочего участка — 18 м,
- максимальная возможная скорость набегающего потока — до 15 м/с.

3.2. Метод измерений. Для моделирования в эксперименте был выбран профиль скорости, характерный для типа местности I, который, согласно [2], определя-



Рис. 4. Расположение вихрегенераторов и призм в рабочей части аэродинамической трубы при проведении эксперимента.

ется соотношением

$$\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где \bar{U}_{ref} — характерная средняя скорость потока на характерной высоте z_{ref} , α — константа профиля для типа местности I, равная 0,13.

Линейный масштаб в эксперименте был равен 1:75; таким образом, 1 метр пограничного слоя атмосферы, который моделировался в ландшафтной аэродинамической трубе, был равен 75 метрам для натуральных условий. Высота 1 метр в масштабе аэродинамической трубы выбрана в качестве характерной высоты. Изменение профиля средней скорости и других характеристик по высоте моделировалось с помощью вихрегенераторов в виде конусов и дискретной шероховатостью в виде призм (рис. 4) [11, 12]. Максимальное значение скорости при проведении данного эксперимента — 14 м/с. Измерения производились в центральном сечении поворотного круга, перпендикулярно направлению набегающего потока (рис. 3). Исследуемый диапазон высот — $z \in [0, 02; 0, 5] H$ от пола, где H — высота рабочей части аэродинамической трубы. Эта зона рабочей части аэродинамической трубы наиболее часто используется при проведении экспериментальных исследований архитектурных объектов, а также большепролетных мостов. В качестве измерительного оборудования в работе был выбран однопиточный термоанемометр, закрепленный на координатном устройстве и перемещающийся в исследуемом пространстве. Нить датчика была ориентирована горизонтально, параллельно полу в рабочей части аэродинамической трубы. В ходе эксперимента ориентация нити не изменялась.

В ходе эксперимента в течение 5 секунд с частотой 2 кГц измерялась актуальная продольная скорость потока. Известно достаточное количество работ, в которых отмечают трудности при моделировании низкочастотной части энергетического спектра в аэродинамических трубах закрытого типа. В данной работе не ставилась задача нахождения масштабов турбулентности, поэтому указанной частоты дискретизации и времени измерения сигнала было вполне достаточно. Корректность выбора обозначенных параметров оценивалась путем сравнения спектральных плотностей, полученных в результате измерений с частотой 2 кГц и временем измерения 5 с, и измерений с частотой 300 Гц и временем измерения 100 с (см. рис. 9). Резуль-

таты, приведенные в данной статье, относятся к измерениям потока над центром поворотного круга (см. рис. 3).

Результатом обработки экспериментальных данных является нахождение следующих параметров: средняя скорость, степень турбулентности, а также энергетические характеристики потока в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы. Средняя скорость определялась по формуле $\bar{U} = \frac{1}{n} \sum u_i$, где n — количество измеренных точек во времени, u_i — мгновенная скорость в i -й момент времени.

Среднеквадратичное отклонение и степень турбулентности определялись по формулам $\sigma_U = \sqrt{(u_i - \bar{U})^2}$ и $It = \sigma_U / \bar{U}$ соответственно.

Более подробно опишем метод определения энергетических характеристик потока. Для получения энергетического спектра пульсаций продольной скорости в точке наблюдения использовался метод Уэлча (Welch's method) с оконной функцией Хэмминга [13]. Отличительная особенность данного алгоритма — уменьшение дисперсии спектральной плотности в следствие разделения исходного сигнала на перекрывающиеся фрагменты, периодограммы которых осредняются для получения спектральной плотности исходного сигнала. В данной работе исходные сигналы разделялись на 10 фрагментов с перекрытием в 20%.

Одной из наиболее часто используемых аппроксимирующих зависимостей для спектральной плотности является зависимость, полученная Ван дер Ховеном в пятидесятые годы прошлого века в результате анализа определенных в натуральных условиях спектральных плотностей в большом диапазоне частот [14]. Основным результатом такого анализа является выделение двух участков — микрометеорологический участок (высокочастотный) с периодами в секунды и минуты и максимумом энергии, приходящимся на период секунд, и макрометеорологический с периодами в десятки и сотни часов и максимумом энергии, приходящимся на период суток.

Особый интерес при моделировании турбулентного потока представляет именно область высоких частот, которая может быть описана также и спектром Давенпорта

$$S(\bar{f}) = \frac{2k_0 v_0^2 \bar{f}^2}{\bar{f} (1 + \bar{f}^2)^{4/3}}, \quad (2)$$

где k_0 — коэффициент, зависящий от типа местности, v_0^2 — скорость ветра на стандартной высоте (обычно 10 м), $\bar{f} = fL/U$ — безразмерная частота, определенная с помощью масштаба скорости U и длины L .

Выражение (2), очевидно, не учитывает изменчивость спектра с высотой. Кроме того, серьезные расхождения наблюдаются в области малых частот, где значение $S(\bar{f}) \sim \bar{f}$, а значит $\lim_{\bar{f} \rightarrow 0} S(\bar{f}) = 0$, а следовательно и интегральный турбулентный масштаб времени теоретически равен нулю.

Несмотря на эти замечания, в инерционном интервале аппроксимация Давенпорта хорошо экспериментально обусловлена. Представленная аппроксимация в настоящее время широко используется в строительных нормах России и других стран. В данной работе предлагается учитывать высоту точки измерения с помощью модифицированной функции приведенной частоты

$$\bar{f} = \frac{fL}{U(z)}. \quad (3)$$

Стоит отметить, что возможна дальнейшая модификация зависимости путем замены масштаба L на интегральный продольный масштаб турбулентности $L_x(z)$.

Помимо аппроксимирующих зависимостей, часто используемых в метеорологии, известны также эмпирические зависимости Кармана (4) и Липмана (5), записанные с использованием волнового числа $k = 2\pi f/U$:

$$S(k) = \frac{2L_x\sigma^2}{\pi} \left[1 + \frac{(kL_x)^2}{0,557} \right]^{-5/6}, \quad (4)$$

$$S(k) = \frac{2L_x\sigma^2}{\pi} \left[1 + (kL_x)^2 \right]^{-1}. \quad (5)$$

Переход от спектральной плотности в пространстве волновых чисел к спектральной плотности, зависящей от частоты, осуществляется по формуле

$$S(f) = \frac{2\pi}{U} S(k). \quad (6)$$

Зависимости Кармана и Липмана записаны с использованием интегрального продольного масштаба турбулентности L_x . Определение масштабов турбулентности с использованием энергетических спектров возможно благодаря соотношению

$$\lim_{f \rightarrow 0} \frac{1}{\sigma^2} S(f) = \frac{4}{U} L_x, \quad (7)$$

Соотношение (7) можно трактовать несколькими способами по причине неопределенности спектра при нулевой частоте. В некоторых известных авторам работах [15] предлагается за значение на нулевой частоте принимать значение, осредненное по 100 первым точкам спектральной плотности. Такой метод может содержать существенные неточности, например, при недостаточности времени измерений. Второй вариант определения заключается в выражении интегрального масштаба турбулентности из одной из аппроксимирующих формул. В данной работе использовано аналитическое уравнение Липмана

$$\frac{S(f_0)U}{4\sigma^2 L_x} = \frac{1}{1 + \frac{4\pi^2 f_0^2}{U^2} L_x^2}, \quad (8)$$

где f_0 — выбранная частота в диапазоне 20–40 Гц. В данной работе выбрана частота $f_0 = 30$ Гц.

Проверкой корректности определения энергетического спектра может служить известное соотношение

$$\int_0^{\infty} S(f) df = \sigma^2. \quad (9)$$

Сравнение всех рассматриваемых в работе энергетических спектров проведено в безразмерной форме с использованием соотношения (9)

$$\bar{S}(f) = \frac{fS(f)}{\sigma^2}. \quad (10)$$

4. Обсуждение результатов. На рис. 5 представлено изменение средней скорости с увеличением высоты. Скорость обезразмеривалась на значение средней скорости на высоте $z = 0,5H$. Здесь и далее используются безразмерная скорость

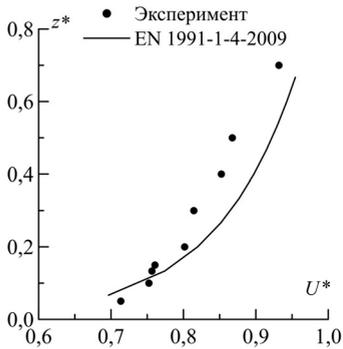


Рис. 5. Профиль средней продольной скорости в пограничном слое.

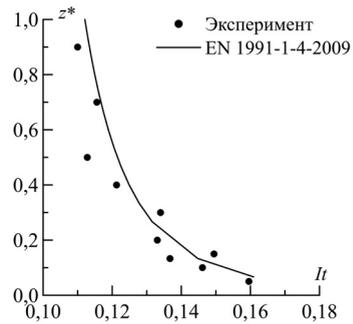


Рис. 6. Интенсивность турбулентности в пограничном слое.

$U^* = \overline{U}(z)/\overline{U}(0,5H)$ и безразмерная высота $z^* = z/(0,5H)$. На рисунки также нанесены сплошные линии — значения средней скорости и интенсивности турбулентности, соответствующие нормативному документу [2]. С увеличением высоты потока скорость увеличивается нелинейно, что соответствует зависимости (1). На рис. 6 представлено изменение интенсивности турбулентности по высоте. Видно, что в отличие от средней скорости, интенсивность турбулентности убывает с ростом высоты. Приведенное сравнение показывает, что отличие профиля средней и пульсационной составляющих скорости, полученной экспериментально, составляет 4–7% от значений, указанных в руководящем документе. Следует отдельно отметить, что указанная точность показывает лишь способность воспроизвести в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы соотношение, описывающее пограничный слой атмосферы.

На рис. 7 представлено изменение мгновенных значений безразмерной продольной скорости (точки) и изменение средней продольной скорости (сплошная линия) на высоте $z^* = 0,18$. Заметим, что помимо высокочастотного изменения мгновенной скорости присутствует низкочастотная составляющая, которую описывает изменяющаяся во времени средняя скорость. Моделирование низкочастотных изменений скорости воздушного потока необходимо для получения корректных данных о продолжительных во времени характеристиках течения. Пульсационная составляющая мгновенной продольной скорости изображена на рис. 8, где пунктирными линиями обозначен интервал изменения пульсаций скорости во времени.

На рис. 9 представлена спектральная плотность энергии в зависимости от частоты, полученная с использованием метода спектрограмм Уэлча. Анализ данных показывает, что в ходе моделирования воспроизведен инерционный интервал, о чем свидетельствует выполнение закона « $-5/3$ ». Изображенная на рис. 9 сплошная линия соответствует «сглаженной» спектральной плотности сигнала, полученного в результате измерений в течение 100 секунд с частотой 300 Гц. Для ее получения использовался метод скользящего среднего с небольшим размером окна (порядка 11 точек). На рис. 10 представлены обезразмеренные в соответствии с зависимостью (10) спектральные плотности на различных высотах. В области высоких частот все функции демонстрируют подобие, что означает моделирование инерционного интервала на всех высотах. Совокупность полученных данных о мгновенных значени-

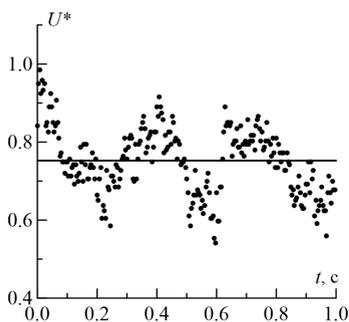


Рис. 7. Изменение актуальной продольной скорости и средней продольной скорости во времени на высоте $z^* = 0,18$.

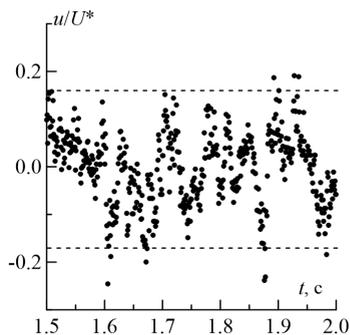


Рис. 8. Изменение пульсационной составляющей продольной скорости во времени на высоте $z^* = 0,18$.

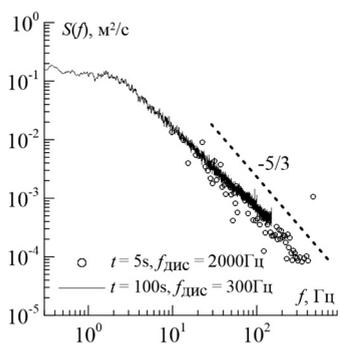


Рис. 9. Спектральная плотность энергии на высоте $z^* = 0,2$.

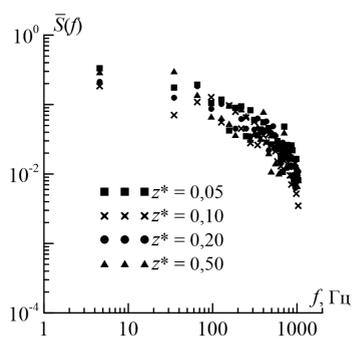


Рис. 10. Безразмерные спектральные плотности энергии для различных высот.

ях продольной скорости и энергетических характеристиках турбулентности потока позволяет сделать вывод о возможности моделирования полностью турбулентного (присутствуют все масштабы турбулентности) пограничного слоя в рабочей части ландшафтной аэродинамической трубы. Не представленный на графиках наиболее энергонесущий интервал (частоты ~ 1 Гц) может быть получен при существенном увеличении времени измерений. Однако, как уже было отмечено, для большинства архитектурных задач наибольший интерес представляет корректное моделирование именно инерционного интервала, т. е. моделирование развитой турбулентности.

На рис. 11 представлено сравнение полученного энергетического спектра на высоте $z^* = 0,8$ от поверхности пола. Можно отметить хорошее совпадение со всеми тремя представленными аппроксимирующими зависимостями. Стоит, однако, отметить, что эмпирическая зависимость Давенпорта лежит несколько ниже экспериментальных точек, а зависимость Липмана предсказывает большую степень убывания спектральной плотности, чем зависимость Кармана или эксперимент.

5. Заключение. В работе представлены некоторые результаты моделирования энергетических характеристик пограничного слоя атмосферы в ландшафтной аэродинамической трубе ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Воспроизведение профиля средней и пульсационной составляющих скорости происхо-

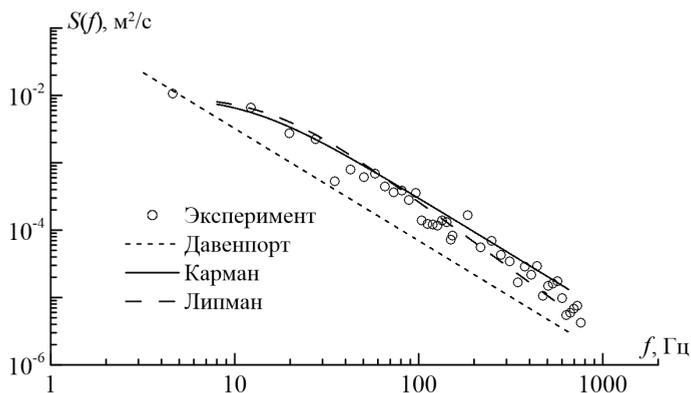


Рис. 11. Сравнение энергетического спектра на высоте $z^* = 0,8$ с известными эмпирическими зависимостями.

дило за счет естественного нарастания пограничного слоя в рабочей части аэродинамической трубы с установленными в ней вихрегенераторами элементами дискретной шероховатости. В качестве дискретной шероховатости использовались конусы и призмы, что является весьма быстрым и технологически простым способом по сравнению с используемыми в отдельных зарубежных установках.

Экспериментальные данные показывают возможность воспроизведения основных характеристик пограничного слоя атмосферы в ландшафтной аэродинамической трубе с приемлемой для практических инженерных задач точностью. Так, воспроизведение профиля средней продольной скорости возможно с точностью 4–7% от нормативных значений. Корректность моделирования энергетических характеристик устанавливалась путем соотнесения результатов эксперимента с известными энергетическими соотношениями: законом « $-5/3$ », аппроксимирующими зависимостями Давенпорта, Кармана, Липмана. Показано, что на всех высотах измерений в распределении спектральной плотности по частотам присутствует инерционный интервал, безразмерные спектры подобны между собой, а также хорошо соответствуют используемым в инженерных расчетах зависимостям.

Литература

1. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Москва, 2016. 105 с.
2. Eurocode 1: Actions on structures — Part 1–4: General actions — Wind actions, European Committee for standardization, 2010. 146 p.
3. Хинце И. О. Турбулентность, ее механизм и теория. М.: Физматгиз, 1963. 680 с.
4. Taylor G. I. The Spectrum of Turbulence // Proc. R. Soc. Lond. A. 1938. P. 476–490.
5. Kolmogorov A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers // Dokl. Akad. Nauk USSR. 1941. Vol. 30. P. 299.
6. Фрот У. Турбулентность. Принципы и применение. М.: Мир, 1980. 530 с.
7. Повз И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1974. 480 с.
8. Wilders P. Parallel Computational Fluid Dynamics // Proceedings of the Parallel CFD 2001 Conference Egmond aan Zee, The Netherlands. May 21–23, 2001.
9. Казакевич М. И. Аэродинамика инженерных сооружений. М., 2014. 168 с.
10. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. М.: Стройиздат, 1978.
11. Burton W. V. Wind Tunnel Simulation of an Atmospheric Boundary Layer // A thesis in mechanical engineering. Texas Tech University, 2001. 73 p.

12. Irwin H. P. A. H. The Design of Spires for Wind Simulation // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1981. P. 361–365.
13. Welch P. D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, AU-15. 1967. No. 2. P. 70–73.
14. Van der Hoven I. Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour // Journal of Meteorology. 1956. P. 160–164.
15. Lamayaa A. *El-Gabry*. Procedure for Determining Turbulence Length Scales Using Hotwire Anemometry // Nasa/TM – 2014-218403. 10 p.

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2018 г.; рекомендована в печать 2 июля 2018 г.

Контактная информация:

Соловьев Сергей Юрьевич — канд. физ.-мат. наук; s_soloviev@ksrc.ru
Храпунов Евгений Федорович — инженер; hrapunov.evgenii@yandex.ru

Modeling of energy characteristics of atmospheric boundary layer

S. Yu. Solovev, E. F. Khrapunov

Krylov State Research Center, Moskovskoye shosse, 44, St. Petersburg, 196158, Russian Federation

For citation: Solovev S. Yu., Khrapunov E. F. Modeling of energy characteristics of atmospheric boundary layer. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2018, vol. 5 (63), issue 4, pp. 689–700. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2018.415> (In Russian).

The paper contains some experimental data obtained in modeling the atmospheric boundary layer in the Landscape Wind Tunnel, a new test facility of the Krylov State Research Centre. The test facility, measurement techniques and test data processing methods are described. The atmospheric boundary layer is modelled in the long test section of this wind tunnel using vortex generators in the form of cones and prism-shaped discrete roughness elements. All flow characteristics are measured using thermoanemometry techniques. A case study of modeling the average and pulsation velocity profile is used to demonstrate that the atmospheric boundary layer can be modelled not only in terms of average characteristics but also in terms of the main energy characteristics with acceptable accuracy for engineering applications. Modelled average characteristics have been verified by comparing the experimental data with the data contained in regulatory documentation on determination of natural wind loads. Correct reproduction of energy characteristics is ensured based on agreement with the known energy relationships: “ $-5/3$ ” law, approximations of Davenport, Karman, Liepmann. It is concluded that, in principle, special-purpose wind tunnels with long test sections are able to simulate the main characteristics of atmospheric boundary layer for various types of terrain.

Keywords: boundary layer of the atmosphere, physical modeling, energy spectrum of turbulence, wind tunnel.

References

1. *SoR 20.13330.2016 Loads and Actions* (Moscow, 2016, 105 p.).
2. *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–4: General actions – Wind actions, European Committee for standardization* (2010, 146 p.).
3. Hinze J. O., *TURBULENCE. An Introduction to its Mechanism and Theory* (McGraw-Hill, 1959, 680 p.).
4. Taylor G. I., “The Spectrum of Turbulence”, *Proc. R. Soc. Lond. A* 476–490 (1938).

5. Kolmogorov A. N., "The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers", *Dokl. Akad. Nauk USSR* **30**, 299 (1941).
6. Frost W., *Handbook of turbulence* (Plenum Press, 1977, 530 p.).
7. Povh I. L., *Aerodynamic experiment in machinery* (Mashgiz, Moscow, Leningrad, 1974, 480 p.).
8. Wilders P., "Parallel Computational Fluid Dynamics", *Proceedings of the Parallel CFD 2001 Conference Egmond aan Zee* (The Netherlands, May 21–23, 2001).
9. Kazakevich M. I., *Aerodynamic of Engineering Structures* (Moscow, 2014, 168 p.).
10. *Guide to the calculation of buildings and structures to the effect of wind* (Stroizdat, Moscow, 1978).
11. Burton W. V., "Wind Tunnel Simulation of an Atmospheric Boundary Layer", *A thesis in mechanical engineering* (Texas Tech University, 2001, 73 p.).
12. Irwin H. P. A. H., "The Design of Spires for Wind Simulation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 361–365 (1981).
13. Welch P. D., "The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms", *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics* AU-15 (2), 70–73 (1967).
14. Van der Hoven I., "Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour", *Journal of Meteorology* 160–164 (1956).
15. Lamayaa A. El-Gabry, "Procedure for Determining Turbulence Length Scales Using Hotwire Anemometry" (Nasa/TM — 2014-218403, 10 p.).

Received: April 10, 2018

Accepted: July 2, 2018

Author's information:

Sergey Yu. Soloviev — s_soloviev@ksrc.ru

Evgenii F. Khrapunov — hrapunov.evgenii@yandex.ru

ХРОНИКА

25 апреля 2018 г. на заседании секции теоретической механики им. проф. Н. Н. Поляхова в Санкт-Петербургском Доме ученых РАН был заслушан доклад доктора физ.-мат. наук, профессора А. С. Шмырова, кандидата физ.-мат. наук, доцента Д. В. Шиманчука и кандидата физ.-мат. наук, доцента В. А. Шмырова (Санкт-Петербургский государственный университет) на тему «Стабилизация орбитального движения в окрестности коллинеарной точки либрации».

Краткое содержание доклада:

Окрестности коллинеарных точек либрации системы Солнце—Земля важны для реализации многих космических проектов. Орбитальное движение здесь неустойчивое, поэтому для обеспечения длительного пребывания космических аппаратов в этих областях требуется решение задачи стабилизации. В докладе рассматриваются различные варианты стабилизирующего управления, проводятся их сравнение и анализ. Приводятся результаты численного моделирования.