

Экспериментальная оценка кинетической энергии турбулентности в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией

А.А. Мамышева, С.Л. Одинцов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 18.04.2011 г.

Приводятся результаты длительных экспериментальных наблюдений кинетической энергии турбулентности в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией. Рассмотрена зависимость кинетической энергии турбулентности от скорости и направления ветра. Обсуждаются особенности этой зависимости, обусловленные влиянием элементов окружающей территории, и возможность ее параметризации степенной функцией.

Ключевые слова: кинетическая энергия турбулентности, направление ветра, скорость ветра, приземный слой атмосферы, ультразвуковой анемометр; turbulent kinetic energy, wind direction, wind velocity, atmospheric surface layer, sonic anemometer.

Введение

При моделировании и прогнозе распространения различных примесей в атмосфере важную роль играют статистические характеристики турбулентных движений. В последние годы активно решается проблема адекватного описания турбулентности в условиях урбанизированной территории. Этой проблеме посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования. Для экспериментальных исследований привлекаются локальные и дистанционные средства диагностики атмосферных процессов. Широкое применение нашли акустические средства измерений характеристик потоков ветра и температуры, в частности ультразвуковые анемометры-термометры [1], относящиеся к локальным средствам диагностики.

Наличие приборов такого класса обеспечивает исследователей всесторонней информацией как по средним значениям (за заданный интервал времени), так и по пульсационным характеристикам контролируемых параметров в приземном слое атмосферы. Эффективность применения «ультразвуковых метеостанций» (далее — УЗМ) для исследования атмосферы и, в частности, характеристик турбулентности способствовала проведению серии комплексных исследований в условиях урбанизированной территории. Например, в работах [2–7] указывается, что для диагностики температурно-ветрового режима в городских условиях использовалось большое количество УЗМ и измерителей другого

типа, размещенных как непосредственно у подстилающей поверхности, так и на крышах зданий. Значительное внимание при подобных исследованиях уделяется вторым моментам компонентов скорости ветра — дисперсиям продольной σ_u^2 , поперечной σ_v^2 и вертикальной σ_w^2 составляющих, а также полной кинетической энергии турбулентности (КЭТ) $E = 0,5(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$, поскольку они существенно влияют на баланс аэрозольных и газовых примесей в пограничном слое атмосферы.

Цель нашей работы заключалась в исследовании зависимости КЭТ от скорости и направления набегающего потока на основе экспериментальных данных в стационарной точке наблюдений. Естественно, что полученные результаты будут характеризовать только конкретное место проведения измерений. Тем не менее представляется полезным провести их сравнение с результатами других авторов, проводивших измерения в аналогичных условиях, и оценить степень совпадения полученных данных.

Отметим, что в представленном материале рассматривается непосредственно величина КЭТ, а не ее нормированные на квадрат динамической скорости значения, как это обычно делается другими исследователями (см., например, [3–6]). Такой подход был связан с оценкой перспективы прогнозирования величины КЭТ на основе лишь скорости и направления ветра, которые в свою очередь прогнозируются с определенной степенью точности. Полученные результаты можно использовать в задачах прогноза распространения примесей, решаемых, в частности, для г. Томска [8], а также для

* Алина Александровна Мамышева (alina434@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

уточнения моделей пограничного слоя над урбанизированной территорией [9].

1. Место, оборудование и сроки проведения измерений

Представленные ниже результаты были получены в пригороде Томска (Академгородок) в течение 2010 г. В качестве измерительного устройства использовалась УЗМ «Метео-2», размещенная на крыше лабораторного корпуса ИОА СО РАН на высоте $H = 17$ м от уровня подстилающей поверхности (5 м от уровня крыши). Пункт наблюдения был окружен строениями разной высоты. Некоторые из них превышали уровень расположения УЗМ. В целом район наблюдений можно характеризовать как урбанизированную территорию с постройками средней этажности и плотными лесопосадками между ними. Орография места наблюдения характеризуется ровной поверхностью, за исключением северных румбов, в направлении которых имеется достаточно быстрое понижение подстилающей по-

верхности. На рис. 1 приведена схема расположения пункта наблюдений с прилегающей территорией.

Используемая для измерений УЗМ «Метео-2» разработана в ИОА СО РАН и имеет сертификат Госстандарта России. Частота получения данных была равна 10,7 Гц. В процессе измерений «акустическими» измерительными каналами определялись температура воздуха и три ортогональные составляющие скорости ветра. Блок контактных датчиков, интегрированный в УЗМ, регистрировал влажность воздуха и статическое атмосферное давление. Описание конструктивных особенностей УЗМ «Метео-2», доступный диапазон измерений метеорологических параметров и другие характеристики представлены в [10].

УЗМ работала в непрерывном круглосуточном режиме. В архив (на электронный носитель) помещались все «мгновенные» данные (данные, полученные с частотой 10,7 Гц). В табл. 1 представлена длительность измерений отдельно по месяцам 2010 г., а также количество 10-минутных интервалов обработки за каждый месяц и за год в целом.

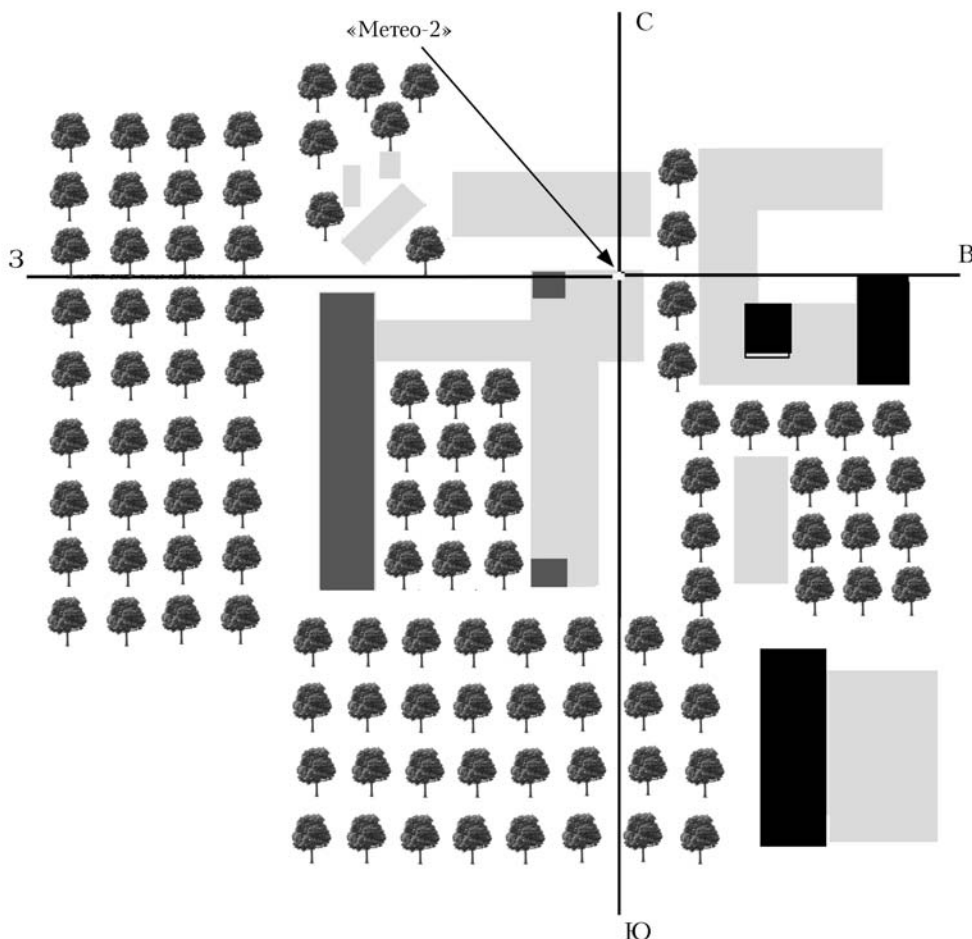


Рис. 1. Схема места проведения измерений (построена не в масштабе). Черные прямоугольники – строения, превышающие по высоте положение УЗМ «Метео-2». Темно-серые прямоугольники – строения, имеющие высоту, сопоставимую с высотой положения УЗМ. Серые прямоугольники – строения, высота которых меньше высоты положения УЗМ. «Облака» точек – лесопосадки с высотой кроны порядка высоты положения УЗМ. Линиями и буквами указана ориентация относительно сторон света

Длительность наблюдений в 2010 г.

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Длительность наблюдений, ч	738,3	665,8	701,7	679,3	711,7	623,5	710,3	716,7	711,0	671,5	640,2	667,5	8237,5
Количество 10-минутных интервалов	4430	3995	4210	4076	4270	3741	4262	4300	4266	4029	3841	4005	49425

В соответствии с представленной таблицей мы полагаем, что статистическая обеспеченность сделанных далее выводов достаточна.

Обработка экспериментальных данных проводилась по 10-минутным интервалам времени. Определялись средние и пульсационные значения продольной (соответствующие обозначения \bar{U} и u'), поперечной (\bar{V} , v') и вертикальной (\bar{W} , w') составляющих скорости ветра. Продольный ветер \bar{U} – среднее значение проекций «мгновенных» значений модуля горизонтальной скорости ветра на среднее за 10 мин направление ветра $\bar{\phi}$. Значение поперечного ветра \bar{V} равно нулю. Значение вертикальной составляющей \bar{W} достаточно часто отличалось от нуля, что объясняется как возможным присутствием регулярной составляющей, так и особенностями распределения «мгновенных» значений на интервале наблюдения. Определялись дисперсии составляющих вектора ветра, полная кинетическая энергия турбулентности, параметр устойчивости (масштаб) Монина–Обухова L , скорость трения $u_* = (\langle u'w' \rangle^2 + \langle v'w' \rangle^2)^{1/4}$ и ряд других характеристик турбулентности. Фильтрация данных, в частности удаление низкочастотных трендов, не проводилась, поскольку для оценок использовались достаточно короткие интервалы времени (10 мин), и мы предполагали, что за эти интервалы резких изменений средних значений параметров и их статистических характеристик не было. При оценках предполагалось выполнение гипотезы Тейлора о возможности перехода от осреднения по ансамблю реализаций к осреднению по времени.

Для достоверного анализа влияния скорости и направления ветра на статистические характеристики турбулентности необходимо иметь достаточную статистику (количество измерений) одновременно по этим двум параметрам. На рис. 2 представлены гистограммы длительности наблюдений различных скоростей и направлений ветра. Гистограммы построены по всем данным за 2010 г.

Скорость ветра группировалась в диапазонах с шагом 0,2 м/с, а направление ветра – в диапазонах с шагом 10°. Был задан критерий достаточности статистики в этих диапазонах в количестве не менее 50 ч наблюдений (300 интервалов наблюдений). Согласно рис. 2, а установленному критерию удовлетворяли скорости ветра в диапазоне от 0,4 до 5,0 м/с. После удаления из обрабатываемого массива измерений тех данных, которые не удовлетворяли указанному диапазону скорости, статистика направлений ветра также изменилась. Но эти изме-

нения не привели к ее понижению ниже заданного порога (50 ч) в каком-либо диапазоне направлений. По этой причине в дальнейшем анализ проводился для всех направлений ветра (0–360°). Естественно, что, рассматривая отдельные месяцы 2010 г. или отдельные ситуации, необходимо вновь проверять статистическую обеспеченность экспериментальных данных. В этом случае «статистический порог» должен быть не 50 ч, а значительно меньше.

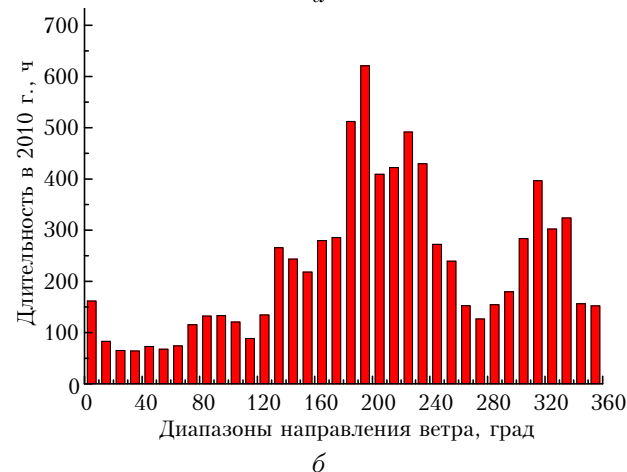
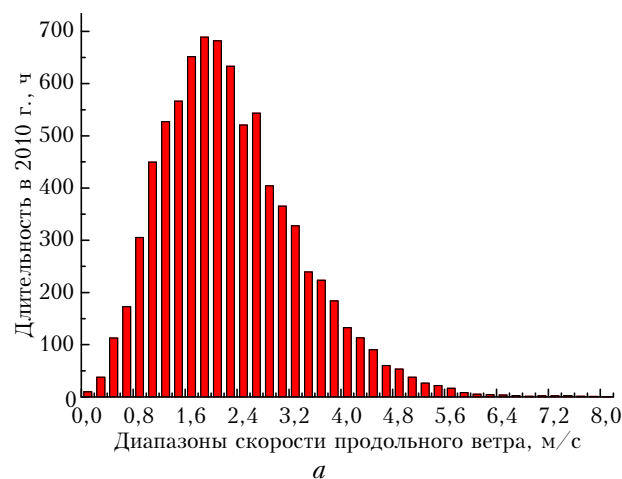
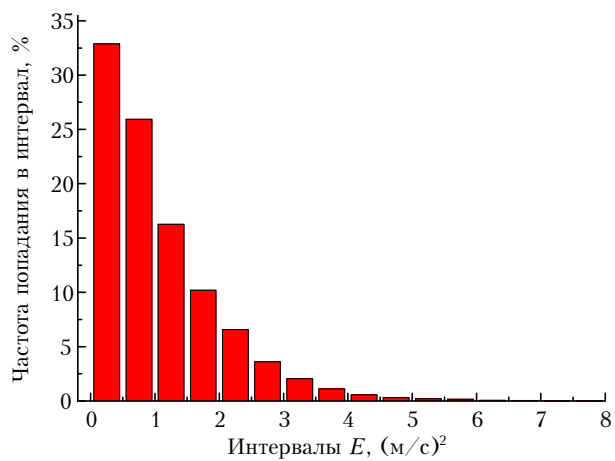


Рис. 2. Суммарная длительность продольной скорости (а) и направления (б) ветра в указанных по шкале абсцисс диапазонах

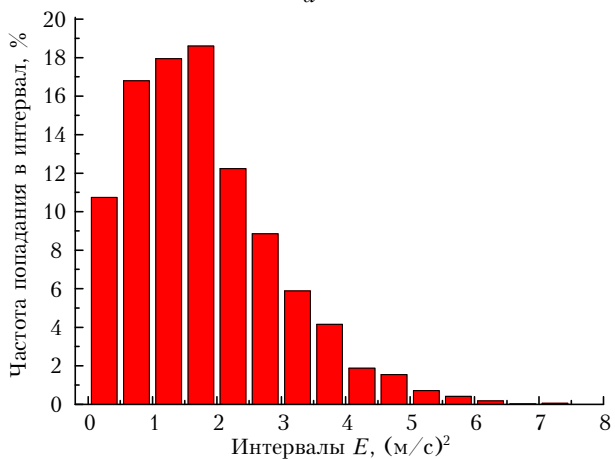
2. Гистограммы распределения КЭТ и ее зависимость от скорости и направления ветра

Рассмотрим статистику КЭТ, используя гистограмму частоты ее попадания в интервалы с шагом

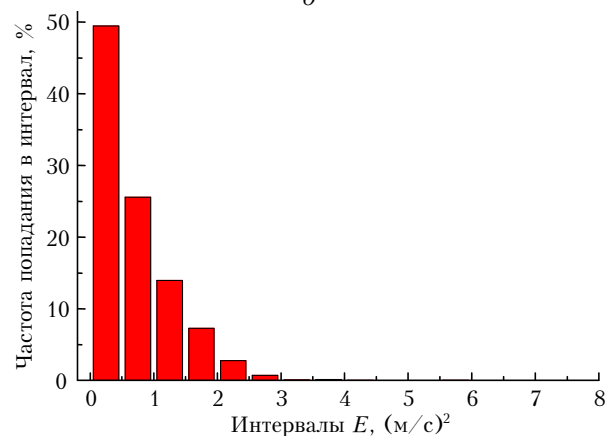
0,5 (м/с)². На рис. 3, *a* показана гистограмма КЭТ при обработке экспериментальных результатов за весь 2010 г. В 95% случаев КЭТ не превышала 3 (м/с)² и примерно треть времени не превосходила 0,5 (м/с)².



a



б



в

Рис. 3. Гистограммы распределения кинетической энергии турбулентности в целом за 2010 г. (*a*), за ноябрь (*б*) и июль (*в*) 2010 г.

Гистограммы КЭТ отдельно для каждого месяца (здесь не приводятся) повторяют форму гисто-

граммы за весь 2010 г. Заметно отличались лишь ноябрь (рис. 3, *б*), когда наблюдалась интенсивная турбулентность и в 95% случаев КЭТ находилась в диапазоне до 4 (м/с)², а также июль (рис. 3, *в*), когда турбулентность была слабой и в 95% случаев КЭТ не превышала 2 (м/с)², оставаясь менее 0,5 (м/с)² примерно в 50% времени. Какой-либо явной связи помесечных гистограмм КЭТ с сезоном года выявить не удалось. Среднее значение КЭТ за 2010 г. составило 1,12 (м/с)², а ее среднеквадратическое отклонение 1,03 (м/с)². Среднее значение скорости трения u_* составило за год 0,37 м/с со среднеквадратическим отклонением 0,19 (м/с)².

Согласно рис. 3, *a* величина КЭТ в пункте наблюдения в целом имела типичные значения. Так, в работе [4] приводятся результаты оценок характеристик турбулентности, полученных в деловой части городов с высокими зданиями плотной застройки (Oklahoma City и New York City, США) в различных точках наблюдений. Среднее значение КЭТ за весь период наблюдений в Oklahoma City (центр города, средняя высота зданий порядка 50 м) на высоте 8 м составило 2,34 (м/с)², меняясь от 0,8 до 4,9 (м/с)² в зависимости от периода наблюдений. В New York City (Madison Square Garden) средние значения КЭТ менялись от 1,5 до 7,5 (м/с)² в зависимости от высоты измерений и периодов наблюдения. По-видимому, эти значения КЭТ можно считать верхней границей для урбанизированной территории при тех скоростях ветра, которые имели место в цитируемых экспериментах.

Более детальный анализ результатов наблюдений в Oklahoma City приведен в работах [3, 5], где представлены, в частности, нормированные на квадрат скорости трения значения КЭТ на разных высотах. Согласно [3], где помимо результатов наблюдений в Oklahoma City приводятся для сравнения результаты других авторов, значение E/u_*^2 изменяется от 3 до 90 в различных ситуациях. Полученные по нашим экспериментальным данным (см. ниже рис. 5, *з*) значения этого отношения изменялись примерно от 5 до 13 в зависимости от направления и скорости ветра и в среднем за год составили 8,2. Примерно такие же значения отношения E/u_*^2 приведены в [6] (с учетом специфической нормировки, детали перехода к которой изложены в [7]). Результаты измерений КЭТ внутри соснового леса и над ним приведены в [11] и составили примерно от 0,25 до 2,1 (м/с)² в зависимости от высоты измерения и типа стратификации. Эти значения также близки к тем, что получены нами (рис. 5, *з*).

Как уже отмечалось выше, основная цель нашей работы заключалась в анализе связи КЭТ со скоростью и направлением набегающего потока. Важность такого исследования определяется орографией местности, структурой застройки вокруг пункта наблюдения, а также положением измерительного прибора на крыше здания. В результате анализа экспериментальных данных за весь 2010 г.

было установлено, что в диапазоне скорости ветра от минимальных значений и примерно до 2 м/с направление ветра слабо влияет на величину КЭТ (см. рис. 4, *a*).

При увеличении скорости начинает проявляться связь КЭТ с направлением ветра, что становится особенно явным при скоростях более 3 м/с (напомним, что рассматриваются средние значения величин за 10-минутный интервал времени). Особенно акцентированно это происходит при потоке ветра с направлений 200–310°, что обусловлено воздействием на поток ветра лесопосадок и комплекса зданий (диапазон направлений 200–260°), а также надстройкой над крышей здания, расположенной примерно в 15 м от мачты с УЗМ и вносящей большие возмущения в поток ветра (диапазон направлений 260–310°).

Еще одним источником повышенных значений КЭТ является комплекс зданий к востоку от точки размещения УЗМ на удалении порядка 30 м и более (диапазон направлений 40–165°). Высота некоторых из этих зданий превышает уровень размещения УЗМ на 10–15 м. Обратим внимание на следующую особенность: в диапазоне направлений набегающего потока 90–150° имеется локальный максимум КЭТ, соответствующий скоростям продольного ветра 4,0–4,5 м/с. Это наблюдается как в суммарных за год результатах (рис. 4, *a*, вклейка), так и за отдельные месяцы (рис. 4, *b*).

Естественно, что в отдельных эпизодах или в отдельные месяцы года картина распределения КЭТ по скоростям и направлениям ветра может отличаться от той, которая представлена на рис. 4, *a*. Примером могут служить ноябрь (рис. 4, *b*, сильная турбулентность) и июль (рис. 4, *в*, слабая турбулентность) 2010 г. Гистограммы КЭТ для этих месяцев приведены на рис. 3, *b*, *в*.

3. Параметризация зависимости КЭТ от скорости и направления ветра

Представленные в предыдущем разделе результаты носят описательный характер. Их польза заключается в составлении общего представления о зависимости КЭТ в условиях урбанизированной территории от направления набегающего потока $\bar{\varphi}$ и его скорости \bar{U} . Однако с точки зрения применимости полученных результатов для решения каких-либо теоретических или практических задач необходимо представить КЭТ в виде функциональных связей с рассматриваемыми параметрами: $E = E(\bar{U}, \bar{\varphi})$. При предварительном анализе результатов было установлено, что удовлетворительной параметризацией КЭТ является степенная функция

$$E = a\bar{U}^b. \quad (1)$$

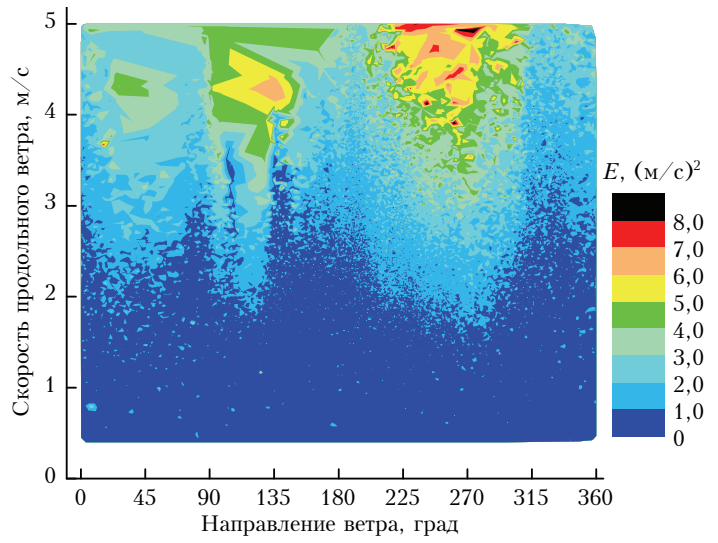
Данная зависимость имеет достаточно простую форму, удобную для последующего применения

в решении прикладных задач. Подгонка заданной модели к экспериментальным результатам обеспечивает приемлемое качество приближения, практически не уступая более сложным моделям. Следует отметить, что модель (1) не учитывает возможное отличие КЭТ от нуля в условиях штиля, когда при отсутствии среднего потока ветра могут существовать вертикальные и горизонтальные турбулентные потоки локального характера (например, из-за неоднородного нагрева/охлаждения подстилающей поверхности урбанизированной территории). Мы не проводили исследования данного случая, поскольку статистическая обеспеченность экспериментальными результатами была недостаточна (согласно рис. 2, *a* ситуации, близкие к штилю, наблюдались суммарно за 2010 г. всего несколько часов).

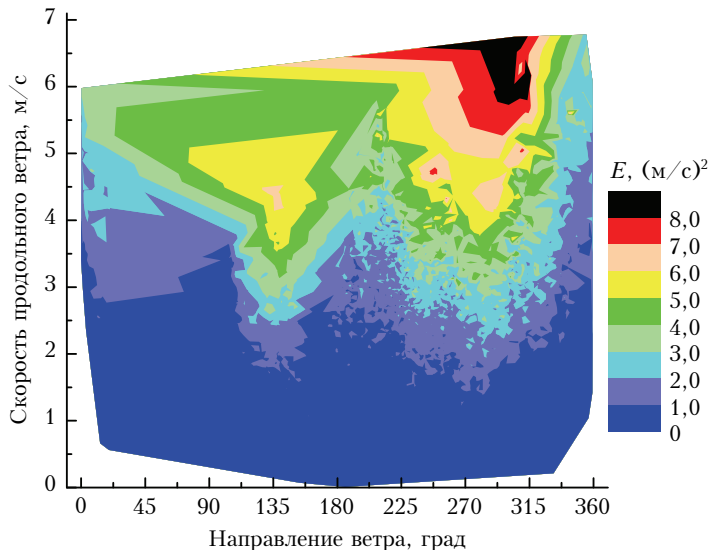
В соотношении (1) подразумевается, что параметры a и b могут быть функциями направления ветра. Нами был проведен анализ влияния направления набегающего потока на величину КЭТ без группировки обрабатываемых данных по типу стратификации, по сезонам года или по другим характеристикам. Весь исходный экспериментальный материал (без применения «статистического порога») был разделен по диапазонам направления ветра с шагом 15°. На рис. 5, *г* представлены средние значения (обозначены квадратами) и среднеквадратические отклонения (СКО, обозначены отрезками) кинетической энергии турбулентности в выделенных секторах направлений в целом за год. Над символами указана общая длительность интервалов времени (часы, округленно), по которым определялись эти величины. На этом же рисунке светлыми значками показаны средние (за год) значения скорости трения u_* при направлении ветра из соответствующих секторов с указанием их среднеквадратических отклонений в виде отрезков.

Для каждого диапазона направлений была проведена аппроксимация КЭТ соотношением (1) с применением регрессионного анализа и получена таблица значений параметров аппроксимации $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$ и $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$. Графический пример аппроксимации для диапазона направлений 225–240° приведен на рис. 5, *a*. Формы аппроксимирующих кривых для нескольких диапазонов направлений показаны на рис. 5, *в*. Здесь же приведены результаты аппроксимации по всему массиву данных за 2010 г. (светлые кружочки), а также результаты только для диапазона скорости продольного ветра 0,4–5,0 м/с (звездочки). В табл. 2 собраны все значения $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$ и $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$, их стандартные ошибки и коэффициенты детерминации $d(\Delta\bar{\varphi}_i)$.

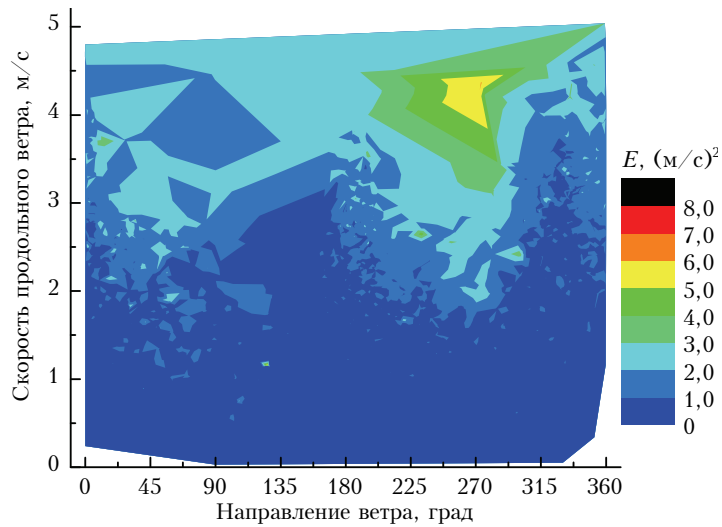
Согласно табл. 2 и рис. 6 (построенному по данным табл. 2) имеется зависимость КЭТ от направления набегающего потока. При этом в некоторых диапазонах направлений поведение аппроксимирующих кривых отличается от типичной формы, что демонстрируется на рис. 5, *в* сплошными символами (для сектора направлений 135–150°).



a



b



v

Рис. 4. Зависимость кинетической энергии турбулентности от скорости и направления ветра по оценкам за весь 2010 г. (*a*), за ноябрь (*b*) и июль (*v*) 2010 г. При построении рисунков *b* и *v* «статистические пороги» не применялись

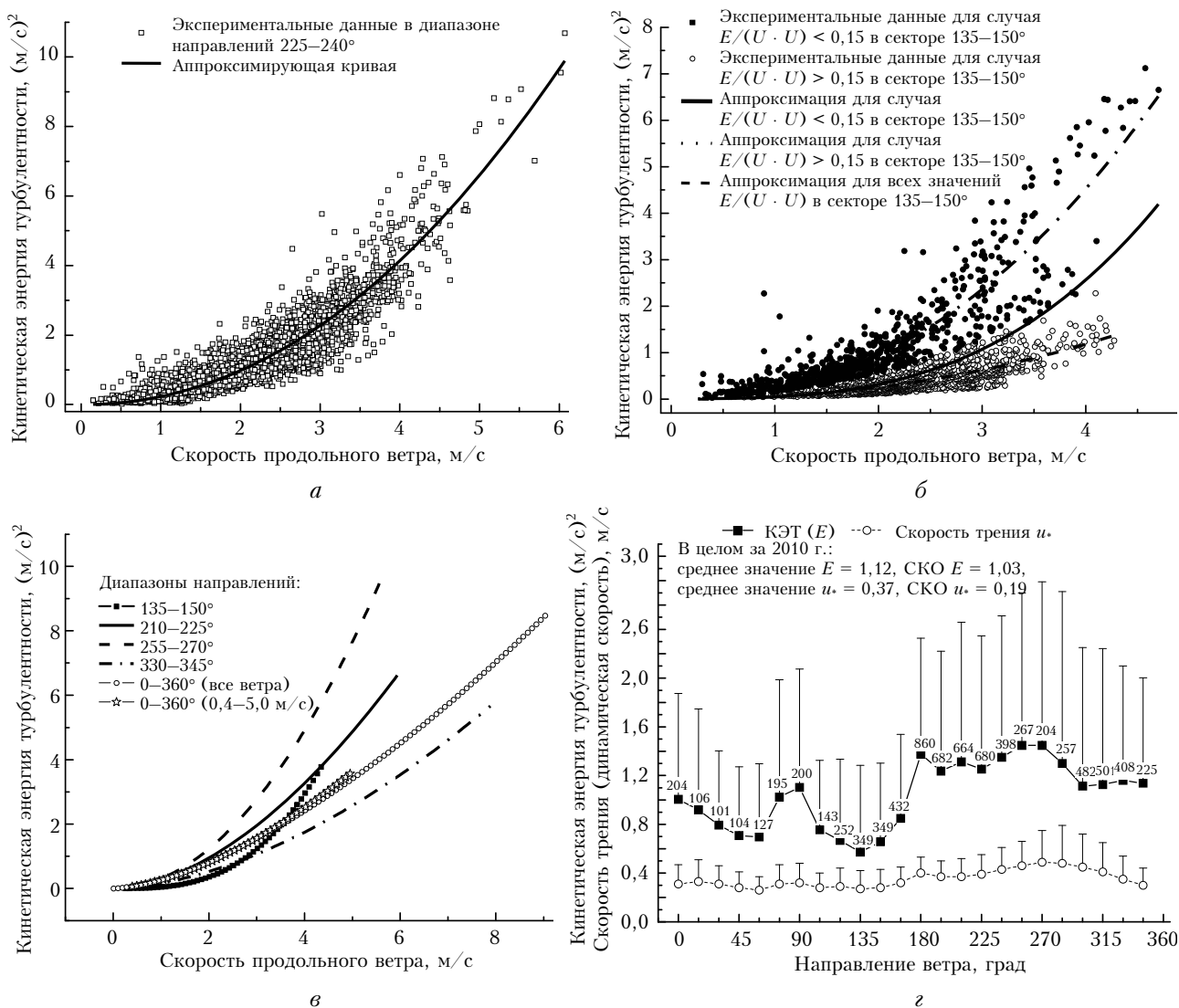


Рис. 5. Кинетическая энергия турбулентности в разных секторах направления ветра: *a* – сектор направлений ветра 225–240° (значки – экспериментальные данные, сплошная линия – результат аппроксимации); *б* – сектор направлений ветра 135–150° (значки – экспериментальные данные, сплошная линия – результат аппроксимации по всей совокупности данных, штриховая линия – только по «верхней» группе данных (светлые значки), штрихпунктирная линия – только по «нижней» (темные значки); *в* – примеры аппроксимирующих функций для разных диапазонов направлений ветра и суммарно по всему диапазону; *г* – средние значения кинетической энергии турбулентности (квадратики) и динамической скорости трения (кружочки) с указанием СКО (вертикальные отрезки) в отдельных секторах направлений ветра (положение символов на оси абсцисс соответствует началу выделенного сектора). Над символами указана длительность наблюдений (часы, округленно)

Качество аппроксимации определяется коэффициентом детерминации d , который можно записать в виде $d = 1 - \beta_R^2 / \beta^2$, где $\beta^2 = \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y})^2$, $\beta_R^2 = \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y})^2$; y_j – исходные значения анализируемой величины с объемом выборки N ; \bar{y} – ее среднее арифметическое значение; \hat{y} – результат «подгонки» [12]. Чем ближе d к единице, тем лучше качество аппроксимации. Согласно рис. 6, *в* имеются диапазоны направлений ветра, где аппрок-

симация выполняется неудовлетворительно. В первую очередь, это относится к секторам направлений 45–60 и 105–165°, поскольку для них коэффициенты детерминации $d(\Delta\bar{\varphi}_i)$ имеют низкие значения. В этих секторах и параметры $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$ и $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$ ведут себя неустойчиво. В других диапазонах направлений ветра изменение параметров аппроксимации происходит более гладко. Отметим только сектор направлений 270–285°, в котором КЭТ при малых скоростях ветра имеет повышенное значение по сравнению с другими направлениями (рис. 6, *а*, повышенное значение параметра a), но при увеличении скорости ветра нарастание КЭТ будет происходить

Таблица 2

Диапазон направления $\Delta\bar{\varphi}_i$, град	Кол-во выборок	Суммарная длительность наблюдений, ч	Параметр $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$	Стандартная ошибка $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$	Параметр $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$	Стандартная ошибка $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$	Коэффициент детерминации $d(\Delta\bar{\varphi}_i)$
0–15	1224	204,0	0,22	0,0092	1,63	0,0315	0,71
15–30	637	106,2	0,27	0,0146	1,71	0,0480	0,66
30–45	605	100,8	0,25	0,0147	1,85	0,0649	0,62
45–60	624	104,0	0,21	0,0144	1,95	0,0779	0,53
60–75	763	127,2	0,19	0,0105	1,85	0,0522	0,62
75–90	1171	195,2	0,12	0,0062	2,16	0,0370	0,80
90–105	1200	200,0	0,22	0,0103	2,01	0,0404	0,74
105–120	856	142,7	0,33	0,0146	1,55	0,0534	0,55
120–135	1509	251,5	0,16	0,0084	2,28	0,0554	0,51
135–150	2356	392,7	0,04	0,0039	3,04	0,0799	0,36
150–165	2111	351,8	0,28	0,0095	1,21	0,0289	0,46
165–180	2593	432,2	0,18	0,0055	1,75	0,0250	0,67
180–195	5162	860,3	0,19	0,0037	1,78	0,0141	0,80
195–210	4094	682,3	0,21	0,0047	1,83	0,0172	0,77
210–225	3983	663,8	0,27	0,0062	1,79	0,0178	0,76
225–240	4082	680,3	0,23	0,0037	2,09	0,0134	0,86
240–255	2389	398,2	0,29	0,0051	2,01	0,0150	0,89
255–270	1601	266,8	0,31	0,0074	2,00	0,0206	0,87
270–285	1224	204,0	0,45	0,0122	1,54	0,0211	0,84
285–300	1542	257,0	0,27	0,0084	1,89	0,0232	0,85
300–315	2889	481,5	0,20	0,0066	1,81	0,0238	0,69
315–330	3008	501,3	0,14	0,0044	1,84	0,0195	0,77
330–345	2449	408,2	0,16	0,0051	1,73	0,0216	0,77
345–360	1350	225,0	0,25	0,0104	1,44	0,0291	0,73
0–360	49399	8237,5	0,28	0,0022	1,54	0,0058	0,62

медленнее, чем в близлежащих секторах направлений ветра (рис. 6, б, пониженное значение параметра b). Это обусловлено влиянием надстройки над крышей здания, расположенной в данном секторе углов (см. рис. 1).

Относительная гладкость изменения функций $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$ и $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$ позволяет надеяться на их параметризацию с применением достаточно простых аналитических выражений. Например, на рис. 6, б показана кривая параболической аппроксимации параметра $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$, которая в целом повторяет экспериментальную зависимость от направления ветра. Однако существенная изменчивость параметров $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$ и $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$ в некоторых секторах направлений усложняет возможность их представления простыми функциями.

Рассмотрим причины невысоких значений $d(\Delta\bar{\varphi}_i)$ на примерах некоторых «проблемных» секторов направления ветра. Наименьший коэффициент детерминации (0,36) соответствует сектору направлений 135–150° (см. табл. 2 или рис. 6, в). Основной причиной неудовлетворительной аппроксимации КЭТ функцией (1) в этом секторе является специфическая группировка экспериментальных значений: неоднозначное (быстрое или слабое) увеличение КЭТ с ростом скорости ветра. Это демонстрирует рис. 5, б, на котором все «облако» экспериментальных значений КЭТ, соответствующих

сектору направлений ветра 135–150°, разделено на две группы с использованием границы 0,15 для величины E/\bar{U}^2 : если $E/\bar{U}^2 > 0,15$ – «стандартная» турбулентность (светлые значки), если $E/\bar{U}^2 \leq 0,15$ – «слабая» турбулентность (темные).

Данный критерий был подобран для сектора 135–150° исходя из необходимости одновременной максимизации коэффициентов детерминации при разделении на группы «стандартной» и «слабой» турбулентности. Каждая группа была аппроксимирована функцией (1). Аппроксимирующие кривые по группам, а также для всей совокупности точек приведены на рис. 5, б. В итоге коэффициенты детерминации в обеих группах существенно повысились: для «стандартной» турбулентности до 0,83, а для «слабой» до 0,57. При аппроксимации «облака» точек каждой группы получается своя комбинация параметров a и b . Они представлены на рис. 6 отдельными символами для соответствующего сектора направлений ветра. На этом же рисунке представлены результаты аналогичной обработки в секторах направлений 105–120 и 120–135°. Раздельная обработка «слабой» и «стандартной» турбулентности в этих секторах также заметно улучшила коэффициенты детерминации d .

Необходимо уточнить, что отнесение турбулентности к разряду «стандартной» или «слабой» носит условный характер, поскольку в некоторых

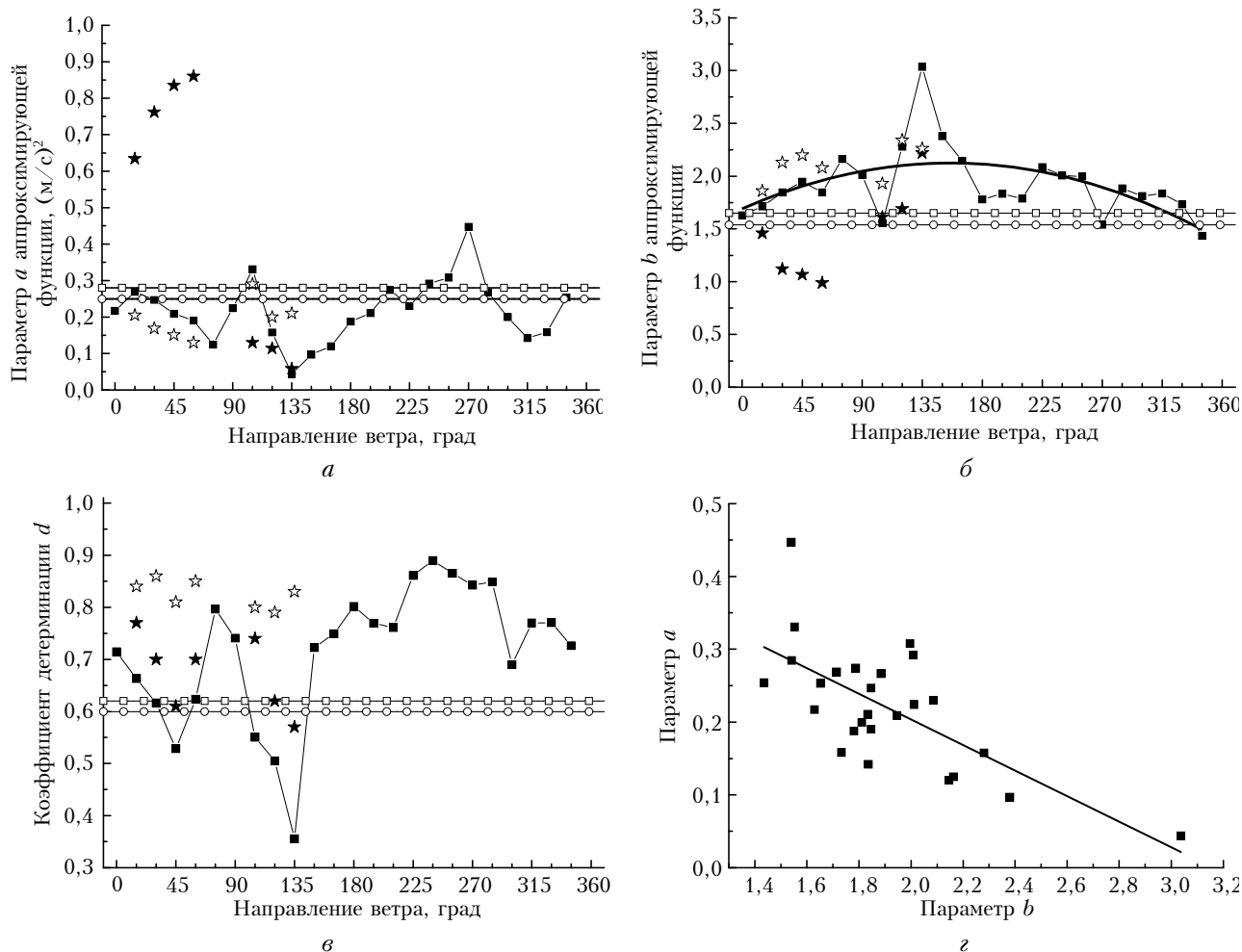


Рис. 6. Зависимость параметров аппроксимирующей функции (a , b) и коэффициента детерминации (v) от направления ветра. Символы на графиках соответствуют началу сектора направлений ветра. Горизонтальными линиями с символами указаны значения параметров, полученных суммарно по всем направлениям ветра (квадратики – для всех скоростей ветра, кружочки – при учете скорости ветра только в диапазоне 0,4–5,0 м/с). Линия без символов (b) – параболическая аппроксимация зависимости параметра b от направления ветра. Звездочками указаны значения параметров при аппроксимации «аномальной» (темные звездочки) и «стандартной» (светлые звездочки) турбулентности; z – зависимость параметра a от параметра b (значки), линейная аппроксимация этой зависимости (линия)

диапазонах направлений, например в секторе 135–150° (рис. 5, б), «слабая» турбулентность может быть чаще, чем «стандартная». «Стандартность» турбулентности следует понимать как принадлежность ее характеристик наиболее часто встречающимся случаям в конкретном месте проведения наблюдений. Можно ожидать, что при проведении измерений на открытой ровной местности «стандартной» будет та турбулентность, которую мы отнесли по величине КЭТ к разряду «слабой» турбулентности над урбанизированной территорией.

Следует отметить два обстоятельства. Во-первых, разделения только по группам «слабой» и «стандартной» турбулентности в рассмотренном диапазоне направлений 105–165° оказалось недостаточно. В соответствии с рис. 5, б следовало бы ввести дополнительную группу «промежуточной» турбулентности (между «слабой» и «стандартной»)

и для нее провести отдельную аппроксимацию. Однако ясный критерий разделения турбулентности на три группы нами пока не установлен. Во-вторых, представленная на рис. 5, б зависимость КЭТ от скорости ветра в диапазоне направлений ветра 135–150° характерна в той или иной степени для всех «проблемных» секторов направлений из диапазона 105–165°.

На данном этапе работы мы не проводили детальный анализ причин, приводящих к различному уровню турбулентности при одной и той же скорости ветра в диапазоне направлений ветра 105–165°. Можно лишь отметить, что эффект «неоднозначной зависимости КЭТ от скорости ветра» чаще всего проявлялся, когда абсолютное значение масштаба Монина–Обухова $|L| > 100$, т.е. при стратификации, стремящейся к безразличной. Вероятно, существует некий, пока не установленный нами фактор, дейст-

вие которого приводит или к «стандартной», или к «слабой» турбулентности в режиме ее генерации сдвиговыми напряжениями в потоке ветра (этот режим характерен для безразличной стратификации). В случае сильной устойчивости ($0 < L < 10$), когда плавучесть была подавлена, а также при очень неустойчивой стратификации ($0 > L > -10$), наступавшей лишь при тихом или легком ветре, имела место только «слабая» турбулентность.

Рассмотрим теперь причины не очень высоких коэффициентов детерминации при аппроксимации КЭТ соотношением вида (1) в диапазоне направлений ветра $15-75^\circ$. В первую очередь это связано с эффектом эпизодического значительного превышения КЭТ некоторой средней величины при фиксированных значениях скорости ветра. В качестве примера на рис. 7, а приведены экспериментальные значения КЭТ совокупно по диапазону направлений ветра $15-75^\circ$, а на рис. 7, б — только для сектора направлений $45-60^\circ$. Темными значками на рис. 7, б обозначены значения КЭТ, которые отнесены к разряду аномально больших. Разделение на «стандартную» и «большую» (аномально большую) турбулентность проведено введением границы $E_R(\bar{U})$, выше которой значения КЭТ полагались «большими», а ниже — «стандартными». Эта граница задавалась степенной функцией вида $E_R(\bar{U}) = \alpha + \beta \bar{U}^m$ (см. линию на рис. 7, а), где параметры функции подобраны исходя из визуальной оценки возможного разделения «облака» экспериментальных данных и какого-либо четкого физического обоснования не имеют.

Разделение значений КЭТ на группы «стандартной» и «большой» турбулентности в отдельных секторах направлений ветра и аппроксимация каждой из этих групп функцией (1) привели к увеличению коэффициентов детерминации $d(\Delta\bar{\varphi}_i)$. Значения $d(\Delta\bar{\varphi}_i)$, а также параметры $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$ и $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$ для каждой группы в секторах направлений $15-75^\circ$ приведены на рис. 6 в виде символов. Значения параметров $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$ и $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$ группы «стандартной» турбулентности остались близки к исходным значениям. Аппроксимация «больших» значений турбулентности функцией (1) показывает зависимость $E = E(\bar{U})$, близкую к линейной.

«Большие» значения КЭТ в диапазоне направлений $15-75^\circ$ имели место в основном при неустойчивой стратификации ($L < 0$). При этом чем сильнее была неустойчивость (чем ближе L к нулю), тем чаще «большие» значения КЭТ появлялись. На рис. 7, в в виде гистограммы представлена суммарная длительность присутствия «больших» значений КЭТ в различных диапазонах значений масштаба Монина–Обухова. На основании рис. 7 можно сделать вывод, что в диапазоне направлений ветра $15-75^\circ$ примерно в 80% случаев «большие» (аномально большие) значения КЭТ имели место при $0 > L > -200$.

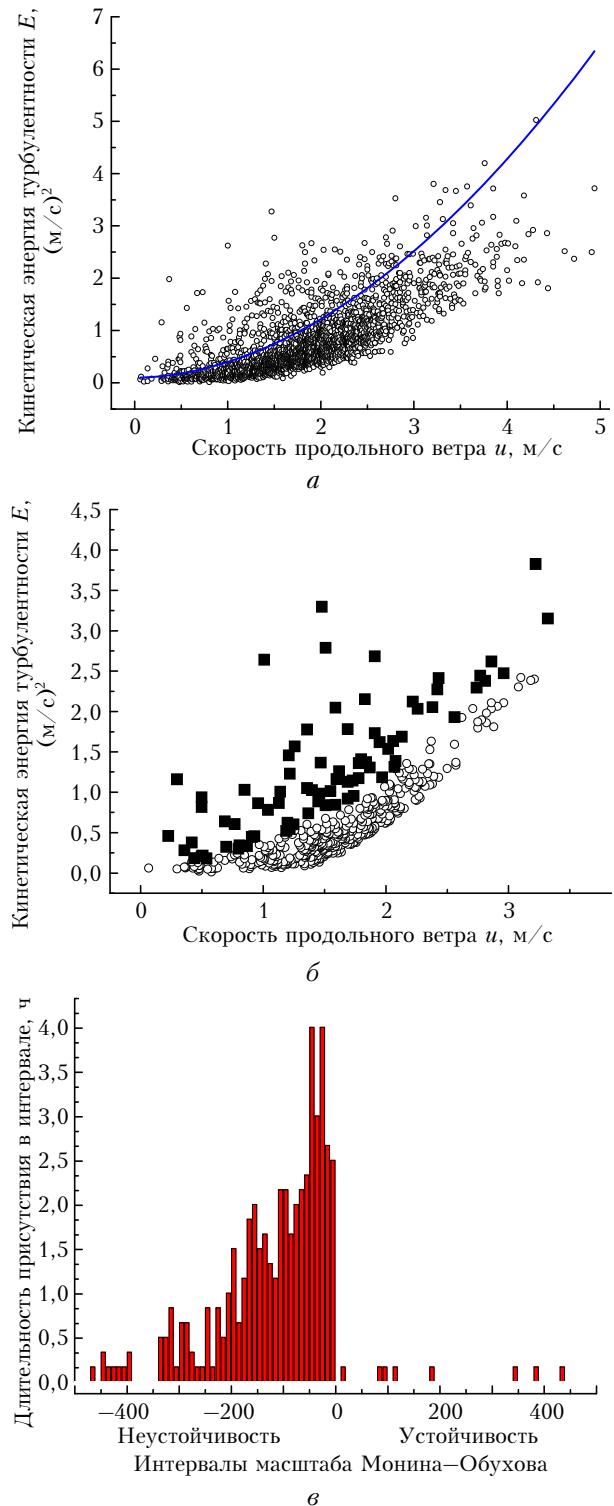


Рис. 7. Зависимость кинетической энергии турбулентности от скорости продольного ветра: а — совокупно по диапазону направлений ветра $15-75^\circ$ (сплошной линией указана граница, разделяющая «стандартные» и «большие» значения КЭТ); б — сектор направлений ветра $45-60^\circ$, светлые значки — «стандартные», темные — «большие» значения КЭТ; в — гистограмма распределения «большой» турбулентности по масштабу Монина–Обухова в диапазоне направлений ветра $15-75^\circ$

Подводя итоги анализа причин невысоких коэффициентов детерминации при аппроксимации функцией (1) экспериментальных значений КЭТ в диапазонах направления ветра от 15 до 165°, можно сделать вывод, что для более адекватной аппроксимации помимо скорости и направления ветра следует учитывать ряд дополнительных факторов, влияющих на энергию турбулентных пульсаций скорости ветра. В частности, при определенных направлениях ветра важно учитывать тип текущей стратификации приземного слоя атмосферы.

Необходимо отметить, что если рассматривать не полную кинетическую энергию, а ее отдельные компоненты (дисперсии составляющих скорости ветра), то те закономерности и неопределенности при параметризации зависимости КЭТ от скорости и направления ветра, которые были отмечены выше, присущи и этим компонентам. Конечно, с некоторыми особенностями, но не носящими принципиального характера.

На данном этапе работы мы не ставили цель получить исчерпывающие модели параметров $a(\Delta\bar{\varphi}_i)$ и $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$ в аппроксимации (1), поскольку это является отдельной и достаточно объемной задачей, требующей, в том числе, большего количества экспериментального материала для статистической обеспеченности анализа отдельных ситуаций. Обратим внимание лишь на определенную связь между параметрами аппроксимирующей функции (1): наблюдается тенденция уменьшения параметра a при увеличении параметра b (см. рис. 6, г, построенный на основании табл. 2).

Продемонстрируем перспективность использования параметризации (1) для прогноза величины

кинетической энергии турбулентности на основе ее зависимости от скорости и направления ветра. Воспользуемся параболической аппроксимацией параметра $b(\Delta\bar{\varphi}_i)$, представленной в виде сплошной кривой на рис. 6, б, а также линейной связью между параметрами a и b , представленной на рис. 6, г прямой линией. Какие-либо особенности зависимости КЭТ от скорости продольного ветра, обсуждавшиеся выше, учитывать не будем. По средним за 10-минутный интервал времени значениям скорости \bar{U} (м/с) и направления ветра $\bar{\varphi}$ (рад) рассчитывается модельная величина КЭТ

$$E_m(\bar{U}, \bar{\varphi}) = a_m(b_m)\bar{U}^{b_m}, \quad (2)$$

где $a_m(b_m) = n_0 + n_1 b_m$ и $b_m(\bar{\varphi}) = m_0 + m_1 \bar{\varphi} + m_2 \bar{\varphi}^2$ — модельные значения параметров аппроксимации с конкретными значениями коэффициентов n_i и m_j . На рис. 8 представлены развертки по времени экспериментальных значений КЭТ (символы) и результатов расчетов (линия) по формуле (2) для августа 2010 г.

Сравнивая экспериментальные данные и модельные оценки величины КЭТ, можно сделать вывод, что степенная зависимость КЭТ от скорости ветра в виде соотношения (2) способна достаточно адекватно представлять ее реальные изменения. Для улучшения качества моделирования необходимо учесть те особенности, которые были рассмотрены выше (закономерности появления «аномально» больших или «аномально» слабых значений КЭТ).

Универсальности модели (1) можно добиться, если задать некоторую «базовую» комбинацию

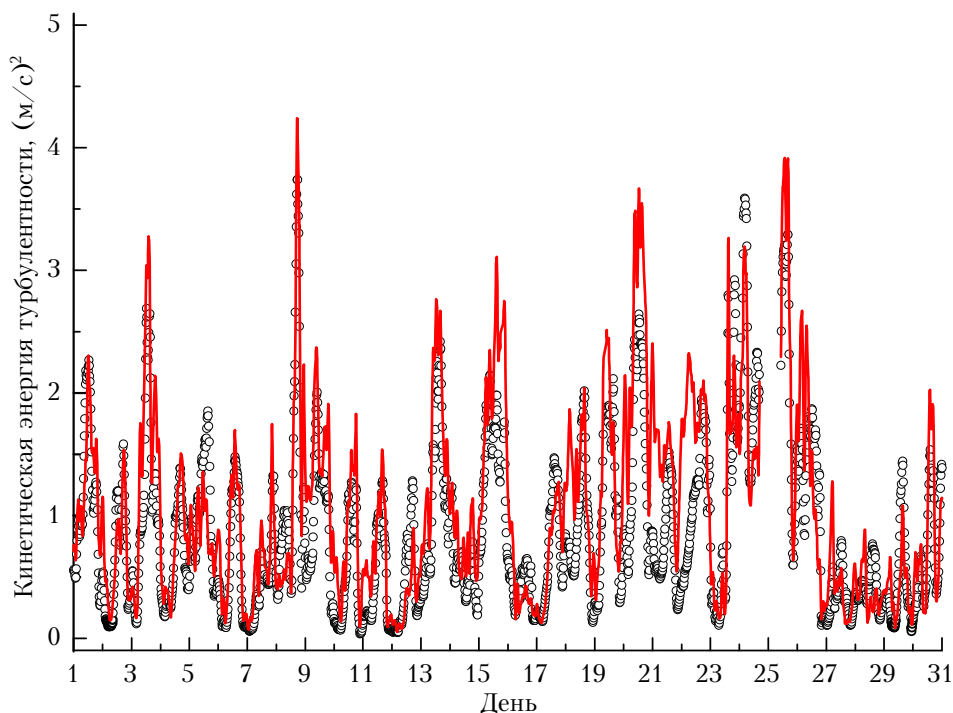


Рис. 8. Кинетическая энергия турбулентности в августе 2010 г. Значки — экспериментальные данные, сплошная линия — результаты вычисления по модели (2). Использовалось сглаживание скользящим средним по 12 точкам

параметров a_0 и b_0 , а специфическое влияние окружающей среды задавать в виде «модулирующих» функций. Например, можно представить формулу (1) в виде

$$E(\bar{U}) = a_0 \alpha(\bar{\varphi}, S) \bar{U}^{b_0 + \mu(\bar{\varphi}, S)}, \quad (3)$$

где $a_0 = 0,2$ и $b_0 = 2$ – «базовые» параметры, а «модулирующие» функции $\alpha(\bar{\varphi}, S)$ и $\mu(\bar{\varphi}, S)$ определяются структурой окружающей пункт наблюдения подстилающей поверхности и дополнительными факторами (текущей стратификацией приземного слоя атмосферы, наличием или отсутствием снежного покрова и т. п.), условно обозначенных здесь параметром S .

Естественно, что каждое конкретное место проведения наблюдений будет иметь собственные формы «модулирующих» функций, которые тем не менее можно попытаться предсказать. Например, для представленных в статье результатов простейшими формами «модулирующих» функций являются $\mu(\bar{\varphi}) = b_m(\bar{\varphi}) - 2$ и $\alpha(\bar{\varphi}) = 5a(b_m)$, а вид функций $a(b_m)$ и $b_m(\bar{\varphi})$ определен в пояснениях к формуле (2). Можно также ожидать, что «базовые» параметры будут разными для существенно различающихся типов подстилающей поверхности (степь, лес, урбанизированная территория, водная поверхность и т. д.) и для различных высот проведения измерений.

Заключение

Результаты анализа зависимости кинетической энергии турбулентности в приземном слое атмосферы урбанизированной территории от скорости и направления ветра показали возможность использования степенной модели этой зависимости. На достаточно большом объеме экспериментального материала сделан вывод, что влияние окружающей пункт наблюдения урбанизированной территории приводит к устойчивой связи параметров степенной модели с направлением ветра и эта связь может быть представлена относительно простыми эмпирическими функциями. Учет влияния отдельных, явно выделяющихся на фоне других, элементов урбанизированной территории может быть осуществлен введением дополнительных параметров и связей в эмпирические функции.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность сотрудникам ИОА СО РАН В.А. Гладких

за техническую поддержку при проведении измерений, а также А.Э. Макиенко за предоставленное программное обеспечение для обработки первичных экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (Госконтракт № 02.740.11.0674 и 14.740.11.0204), а также проекта № 4.1 Президиума РАН.

1. *Тихомиров А.А.* Ультразвуковые анемометры и термометры для измерений пульсаций скорости и температуры воздушных потоков: Обзор // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 585–600.
2. *Nelson M.A., Pardyjak E.R., Klewicki J.C., Pol S.U., Brown M.J.* Properties of the wind field within the Oklahoma City Park Avenue street canyon. Part I: Mean flow and turbulence statistics // J. Appl. Meteorol. and Climatol. 2007. V. 46, N 12. P. 2038–2045.
3. *Nelson M.A., Pardyjak E.R., Klewicki J.C., Pol S.U., Brown M.J.* Properties of the wind field within the Oklahoma City Park Avenue street canyon. Part II: Spectra, cospectra and quadrant analyses // J. Appl. Meteorol. and Climatol. 2007. V. 46, N 12. P. 2055–2073.
4. *Hanna S., White J., Zhou Y.* Observed wind, turbulence, and dispersion in build-up downtown areas of Oklahoma City and Manhattan // Boundary-Layer Meteorol. 2007. V. 125, N 3. P. 441–468.
5. *Ramamurthy P., Pardyjak E.R., Klewicki J.C.* Observations of the effect of atmospheric stability on turbulence statistics deep within an urban street canyon // J. Appl. Meteorol. and Climatol. 2007. V. 46, N 12. P. 2074–2085.
6. *Rotach M.W.* Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon // Atmos. Environ. 1995. V. 29, N 13. P. 1473–1486.
7. *Rotach M.W.* Turbulence close to a rough urban surface. Part I: Reynolds stress // Boundary-Layer Meteorol. 1993. V. 65, N 1–2. P. 1–28.
8. *Панасенко Е.А., Старченко А.В.* Определение городских районов-загрязнителей атмосферного воздуха по данным наблюдений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 3. С. 279–283.
9. *Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И.* Моделирование вертикальной структуры ночного пограничного слоя над шероховатой поверхностью // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 4. С. 315–320.
10. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7 (109). С. 21–25.
11. *Lee Y.-H.* The influence of local stability on heat and momentum transfer within open canopies // Boundary-Layer Meteorol. 2009. V. 132, N 3. P. 383–399.
12. *Колмаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. школа, 1991. 400 с.

A.A. Mamysheva, S.L. Odintsov. Experimental estimate of turbulent kinetic energy in the near-surface layer over urban area.

The paper presents the results of analysis of turbulent kinetic energy, inferred from long-term experimental observations in the near-surface layer over urban area. The dependence of the turbulent kinetic energy on the wind speed and direction is considered. The specific features of this dependence, arising due to the effect of elements of the urban environment, and the possibility of its parameterization with the help of power-law function are discussed.