

УДК 551.551

Анализ зависимости нормированной кинетической энергии турбулентности от направления ветра и типа стратификации 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 19.09.2011 г.

Обсуждаются результаты анализа нормированной на скорость трения кинетической энергии турбулентности (E_n) в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией. На основе натурных измерений исследовалась зависимость E_n от направления среднего ветра и типа стратификации. Рассмотрены различные модели E_n , и проведено их сопоставление с экспериментальными данными. Установлено, что использованные модели E_n не обеспечивают должное качество моделирования в тех условиях, которые имелись при натурных измерениях. Предполагается, что для адекватного моделирования E_n требуется учитывать не только направление среднего ветра и тип текущей стратификации, но и другие характеристики потока ветра.

Ключевые слова: кинетическая энергия турбулентности, скорость трения, приземный слой атмосферы, направление ветра, стратификация, моделирование, натурные измерения; kinetic energy of turbulence, friction velocity, atmospheric surface layer, wind direction, stratification, simulation, field measurements.

Значительное внимание при исследовании характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией уделяется кинетической энергии турбулентности (КЭТ) $E = 0,5(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$ и отдельным ее составляющим (дисперсиям компонентов вектора ветра $\sigma_{u,v,w}^2$). Чаще всего изучаются нормированные значения КЭТ $E_n = E/u^2$ и дисперсий $\sigma_{ni}^2 = \sigma_i^2 / u^2$ (здесь индекс i обозначает составляющую вектора ветра). При этом нормирующим множителем служит скорость трения (динамическая скорость)

$$u_* = (\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2})^{1/4},$$

где u' , v' и w' — пульсации продольной, поперечной и вертикальной составляющих вектора ветра соответственно; черта сверху обозначает усреднение за интервал времени Δt (предполагаются выполнение гипотезы Тейлора и возможность перехода от усреднения по ансамблю реализаций к усреднению по интервалу времени).

Как правило, изучаются зависимости E_n и σ_{ni}^2 от типа текущей стратификации атмосферы, характеризующейся величиной и знаком масштаба Монина–Обухова $L = -u_*^3 \Theta / \kappa g \overline{w'\theta'}$, где $\kappa = 0,4$ — по-

стоянная Кармана; g — ускорение свободного падения; $\overline{w'\theta'}$ — вертикальный турбулентный поток температуры воздуха; Θ и θ' — средняя и пульсационная составляющие потенциальной температуры воздуха. Вводится безразмерная переменная $\xi = z/L$, где z — высота измерений. На основе обработки экспериментальных данных обычно формируются эмпирические зависимости (модели) вида

$$E_{nm}(\xi) = c_E^2 [1 + d_E |\xi|]^{2/3}$$

и

$$\sigma_{nmi}(\xi) = \sqrt{\sigma_{nmi}^2} = c_{\sigma i} [1 + d_{\sigma i} |\xi|]^{1/3}$$

с постоянными значениями параметров c_x и d_x , разными для различных типов стратификации (см., например, [1–3]). Наличие индекса m здесь и далее обозначает модельную величину. Скорость и направление ветра в этих зависимостях не учитываются.

Однако над урбанизированной территорией с неоднородным распределением элементов подстилающей поверхности (застройка разной этажности, лесопарковые зоны) можно ожидать заметное влияние характеристик среднего потока, в частности направления ветра ϕ , на значения E_n и σ_{ni}^2 через коэффициенты и показатели степени модельных функций вида

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

$$E_{nm}(\varphi, \xi) = c_E^2(\varphi)[1 + d_E(\varphi)|\xi|]^{2\alpha(\varphi)}; \quad (1)$$

$$\sigma_{nmi}(\varphi, \xi) = \sqrt{\sigma_{ni}^2} = c_{\sigma i}(\varphi)[1 + d_{\sigma i}(\varphi)|\xi|]^{\beta i(\varphi)}. \quad (2)$$

В настоящей статье на основе экспериментальных данных исследуется возможность получения модели $E_n = E/u_*^2$ в форме (1) для конкретной точки наблюдения над урбанизированной территорией. Анализ моделей $\sigma_{nmi}(\varphi, \xi)$ является отдельной задачей и в план данной публикации не входил. Отметим лишь, что выводы, сделанные относительно E_n , в целом будут справедливы и для σ_{nmi} .

Экспериментальные данные были получены в течение 2010 г. в г. Томске (Академгородок) с помощью ультразвуковой метеостанции (УЗМ) «Метео-2», размещенной на мачте над крышей здания (5 м над крышей, 17 м от уровня подстилающей поверхности), окруженного лесопосадками и постройками различной высоты. Подробная схема размещения и характеристики УЗМ изложены в работе [4], где публикуются результаты исследования зависимости непосредственно кинетической энергии турбулентности E от скорости и направления ветра. Необходимость исследования зависимости нормированной величины КЭТ E_n от направления ветра обусловлена тем, что нормирующий множитель (скорость трения) u_* также может быть функцией направления ветра.

Обработка экспериментальных данных велась по интервалам времени $\Delta t = 10$ мин (период усреднения). В итоге был получен дискретный ряд средних значений метеорологических параметров, а также различных характеристик турбулентности (одноточечных центральных и смешанных моментов компонентов вектора ветра и температуры воздуха). Общее количество 10-минутных интервалов обработки составило 49396 значений. Из них 10262 были получены при $L > 0$ (все типы устойчивой стратификации) и 39134 – при $L < 0$ (все типы неустойчивой стратификации).

Основная цель наших исследований заключалась в получении эмпирической зависимости вида $E_{nm}(\varphi, \xi) = c_E^2(\varphi)[1 + d_E(\varphi)|\xi|]^{2\alpha}$ и анализе ее параметров. Базой для исследований являлись дисперсии ($\sigma_{u,v,w}^2$) и смешанные моменты ($\overline{u'w'}$, $\overline{v'w'}$) компонентов вектора ветра, позволяющие получить экспериментальные оценки $E_n = E/u_*^2$. Статистическая обеспеченность оценок $E_n(\varphi, \xi)$ для комбинаций значений φ и ξ была различной. На рис. 1, а представлены гистограммы распределения направления ветра φ при $L > 0$ и $L < 0$. Над колонками указана суммарная длительность наблюдений в соответствующем интервале направлений ветра (целое количество часов).

Очевидно, что при устойчивой стратификации ($L > 0$) статистическая обеспеченность оценок в диапазоне $240^\circ < \varphi \leq 360^\circ$ невысока. По нашему мнению, причина малого количества случаев устойчивой стратификации в отмеченном диапазоне на-

правлений ветра связана с влиянием повышенной шероховатости подстилающей поверхности, когда исходный устойчиво стратифицированный поток приобретает высокую степень неоднородности в некотором диапазоне высот над лесопосадками и крышами зданий и становится нейтрально стратифицированным (или даже слабо неустойчивым). При этом точка наблюдения для $240^\circ < \varphi \leq 360^\circ$ попадает в окрестности своеобразного «острова» нейтральной стратификации, который должен достаточно быстро завершиться вниз по потоку из-за «плохой памяти» турбулентности.

Данное утверждение основано на результатах сопоставления функций распределения масштаба Монины–Обухова для диапазонов направления ветра $0^\circ \leq \varphi < 240^\circ$ и $240^\circ < \varphi \leq 360^\circ$ в ночное время, когда в приземном слое атмосферы обычно образуется инверсия температуры (устойчивая стратификация). На рис. 1, а (фрагмент) показаны функции распределения величины L , согласно которым устойчивая стратификация в интервале времени 00:00–07:00 значительно чаще имеет место при направлениях ветра из диапазона $0^\circ \leq \varphi < 240^\circ$ по сравнению с диапазоном $240^\circ \leq \varphi < 360^\circ$. Это служит косвенным доказательством того, что при одинаковых исходных условиях (в целом устойчиво стратифицированный поток ветра в приземном слое ночной атмосферы) вертикальные турбулентные потоки тепла, определяющие параметр L , могут менять свою величину (и даже знак) над подстилающей поверхностью с усложненной структурой.

Гистограммы распределения величины $\sqrt{E_n}$ для случаев $L > 0$ и $L < 0$ приведены на рис. 1, б. Имеется некоторое смещение распределений. В частности, при неустойчивой стратификации для среднего за год значения нормированной кинетической энергии турбулентности \bar{E}_n величина $\sqrt{\bar{E}_n} \approx 2,7$, а при устойчивой $\sqrt{\bar{E}_n} \approx 2,9$. В целом оценки \bar{E}_n согласуются со значениями, приводимыми другими авторами для урбанизированных территорий и территорий с лесопосадками (см., например, [5–7]).

Параметр $c_E(\varphi)$ в формуле (1) можно определить, рассматривая случаи больших значений $|L|$, когда аргумент $|\xi| = z/|L| \rightarrow 0$ (безразличная стратификация приземного слоя атмосферы). Согласно [8] (модель Т–ИЭМ) безразличная стратификация имеет место при $|L| > 100$. Из дискретного ряда экспериментальных данных нами были выделены случаи, когда выполнялось условие $|L| > 100$ (выборка из 22934 отсчетов), и для них вычислялись значения $c_E(\varphi_j) = \sqrt{E_n(\Delta\varphi_j, \xi \approx 0)}$ в интервалах направлений ветра с шагом $\Delta\varphi = 15^\circ$. Высота измерений z полагалась равной 5 м (высота над уровнем крыши). На рис. 2, а приведены графики величин $c_E(\varphi_j)$ и их среднеквадратические отклонения (СКО), полученные для $|L| > 100$, а также для $|L| > 1000$ (выборка из 3315 отсчетов), когда условие $\xi \rightarrow 0$ заведомо выполняется для $z = 5$ и 17 м (высота измерений над уровнем подстилающей поверхности).

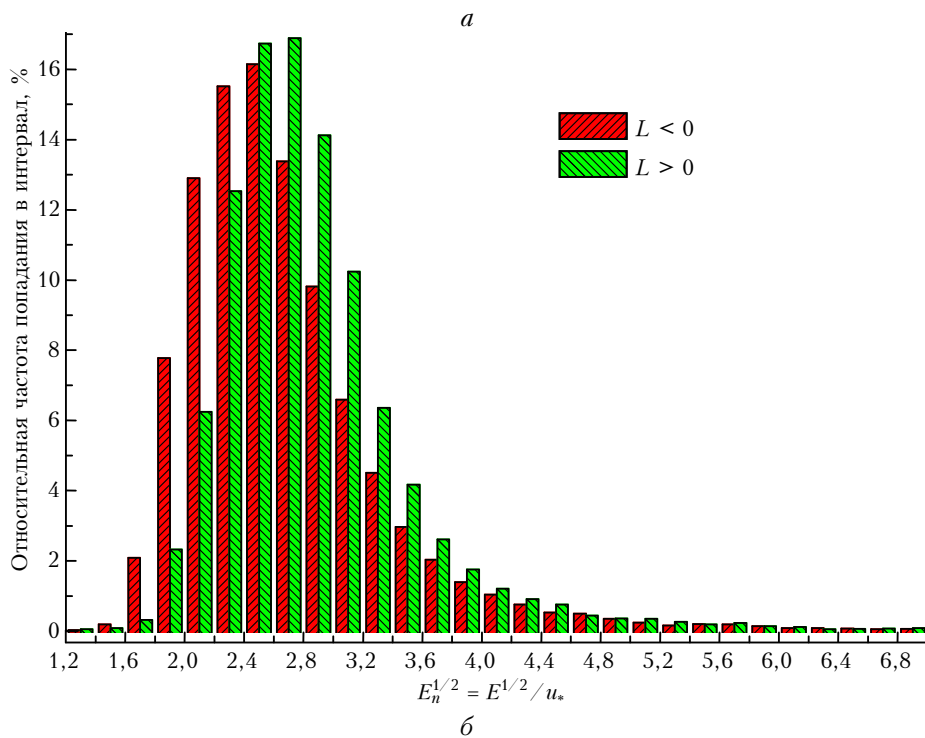
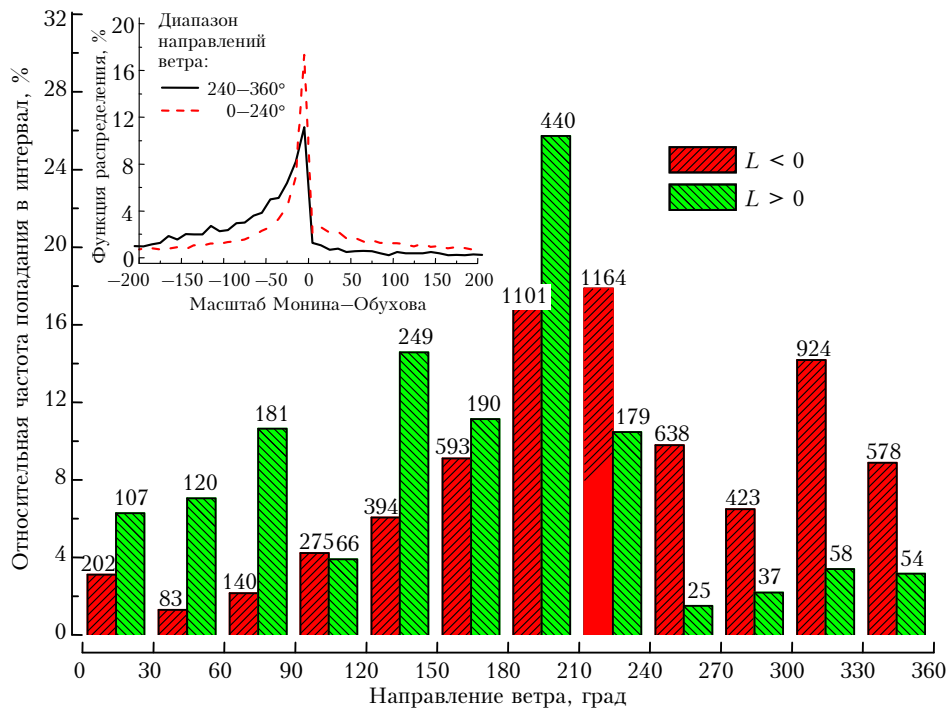


Рис. 1. Гистограммы распределения направления ветра φ (а) и величина $\sqrt{E_n}$ (б) при разных типах температурной стратификации. Над колонками указаны суммарные длительности наблюдений (целое количество часов). На фрагменте (а) представлены функции распределения параметра устойчивости L в ночное время (суммарно за 2010 г.) для указанных диапазонов направлений ветра

Аппроксимация дискретных значений $c_E(\varphi_j)$ полиномом 9-го порядка (обозначим далее аппроксимирующую функцию в виде $c_{Em}(\varphi)$) обеспечивает приемлемое качество аналитического представления данного параметра. Графики $c_{Em}(\varphi)$ для случаев $|L| > 100$ и $|L| > 1000$ показаны на рис. 2, б в виде

круговых диаграмм. Согласно рис. 2 параметр c_{Em} зависит от направления ветра, меняясь в диапазоне от 2 до 3 со средним значением 2,6 (совокупно по диапазону направлений 0–360°). В дальнейшем экспериментальные значения $E_n(\varphi, \xi)$ нормировались на модельную функцию $c_{Em}^2(\varphi)$ и полученный

дискретный ряд «полуэмпирических» значений $G(\varphi, \xi) = E_n(\varphi, \xi) / c_{Em}^2(\varphi)$ служил основой для последующего анализа.

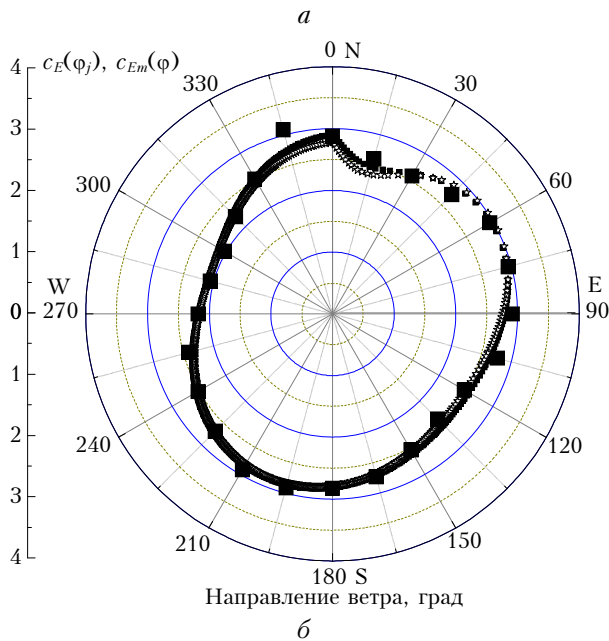
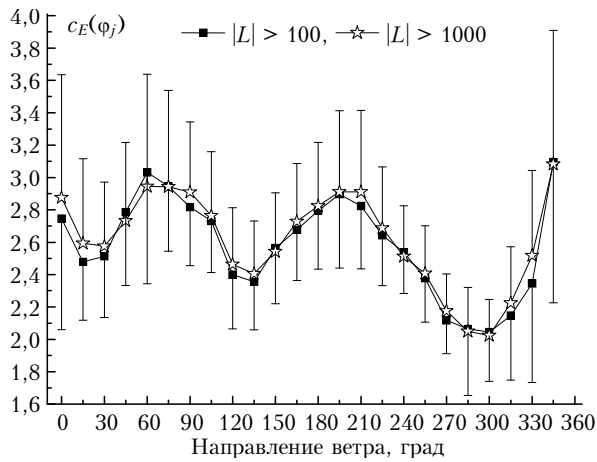


Рис. 2. Зависимость дискретных значений $c_E(\varphi_j)$ (а), а также аппроксимирующих функций $c_{Em}(\varphi)$ (б) от направления ветра для случаев $|L| > 100$ (мелкие квадраты) и $|L| > 1000$ (звездочки); отрезками указаны СКО величин $c_E(\varphi_j)$ (а); отдельные большие квадраты – значения $c_E(\varphi_j)$ для случая $|L| > 100$ (б)

По результатам измерений также были получены «среднегодовые» модели величины E_n отдельно для устойчивой и неустойчивой стратификаций.

Для устойчивой стратификации ($L > 0$)

$$E_n^{1/2}(|\xi|) = 2,74(1 + 2,11|\xi|)^{1/3}, \quad (3)$$

$$E_n(|\xi|) = 7,51(1 + 2,11|\xi|)^{2/3}. \quad (3a)$$

Для неустойчивой стратификации ($L < 0$)

$$E_n^{1/2}(|\xi|) = 2,61(1 + 0,26|\xi|)^{1/3}, \quad (4)$$

$$E_n(|\xi|) = 6,81(1 + 0,26|\xi|)^{2/3}. \quad (4a)$$

Основная цель работы заключалась, как отмечалось выше, в оценке применимости модели E_n

в виде функции (1) с показателем степени $\alpha = 1/3$, наиболее часто используемом при моделировании. Поскольку аналитическое представление параметра $c_E(\varphi)$ определено, то необходимо на основе экспериментальных данных найти аналитическое представление параметра $d_E(\varphi)$.

Для упрощения анализа значения $G(\varphi, \xi)$ сначала возводились нами в степень «3/2». Затем весь массив значений $[G(\varphi, \xi)]^{3/2}$ разделялся по диапазонам направления ветра с шагом $\Delta\varphi = 15^\circ$ ($0 \leq \varphi \leq 360^\circ$) и в каждом диапазоне производилась аппроксимация экспериментальных данных функцией вида

$$D_F = 1 + d_F(\varphi)|\xi|,$$

соответствующей анализируемой модели

$$E_{Fm} = c_{Em}^2 [1 + d_F|\xi|]^{2/3}.$$

Здесь введено обозначение $d_F(\varphi)$ для модельного представления параметра $d_E(\varphi)$. Для примера на рис. 3 приведены дискретные значения $[G(\varphi, \xi)]^{3/2}$ в отдельных диапазонах направлений ветра и результаты их аппроксимации.

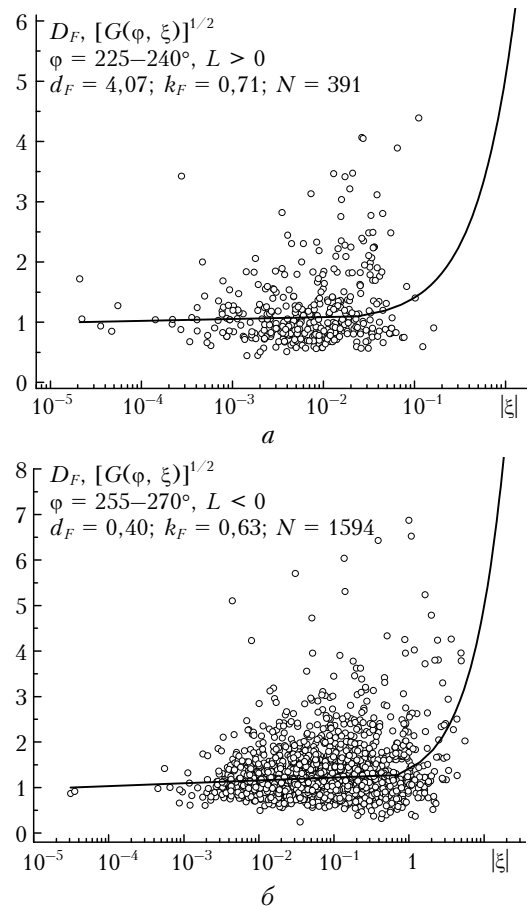


Рис. 3. Экспериментальные данные (символы) и результаты их аппроксимации (линии) в диапазонах направления ветра 225–240° для устойчивой стратификации (а) и 255–270° для неустойчивой стратификации (б). Приведены значения параметра $d_F(\varphi_j)$, коэффициента детерминации $k_F(\varphi_j)$ и объема выборки N , по которой проведена аппроксимация. Высота измерений $z = 5$ м

Таблица содержит значения параметра $d_F(\varphi_j)$ и его стандартные ошибки, а также колонку с коэффициентом детерминации $k_F(\varphi_j)$, который характеризует качество аппроксимации экспериментальных данных какой-либо функцией [9]. Высокое качество имеет место при $k_F \rightarrow 1$, неудовлетворительное – при $k_F \rightarrow 0$.

Диапазон направлений ветра φ_j , град	Объем выборки	Параметр $d_F(\varphi_j)$	Стандартная ошибка $d_F(\varphi_j)$	Коэффициент детерминации $k_F(\varphi_j)$	Параметр $d_L(\varphi_j)$	Коэффициент детерминации $d_L(\varphi_j)$
<i>Устойчивая стратификация ($L > 0$)</i>						
0–15	361	7,00	0,06	0,97	0,11	0,87
15–30	284	15,28	0,76	0,60	0,59	0,93
30–45	318	3,73	0,23	0,75	0,64	0,97
45–60	406	2,46	0,16	0,54	0,21	0,96
60–75	540	1,45	0,10	0,40	0,09	0,93
75–90	566	2,40	0,63	0,12	0,31	0,94
90–105	206	3,72	0,40	0,45	0,45	0,94
105–120	183	7,43	0,77	0,38	0,42	0,93
120–135	549	0,93	0,17	0,16	0,09	0,94
135–150	947	1,42	0,11	0,33	0,16	0,96
150–165	552	1,49	0,09	0,49	0,16	0,96
165–180	591	0,93	0,07	0,69	0,14	0,97
180–195	1487	0,93	0,07	0,69	0,43	0,97
195–210	1156	24,20	0,35	0,82	0,90	0,96
210–225	690	35,93	1,14	0,63	2,10	0,94
225–240	379	4,06	0,32	0,71	0,59	0,97
240–255	100	4,74	1,84	0,84	1,16	0,98
255–270	57	18,26	3,59	0,64	3,00	0,97
270–285	83	0,27	0,09	0,83	0,06	0,98
285–300	140	6,54	0,28	0,83	0,43	0,96
300–315	163	6,07	0,70	0,45	0,68	0,94
315–330	186	3,71	0,37	0,44	0,34	0,90
330–345	144	8,06	1,72	0,14	0,42	0,86
345–360	181	5,41	0,29	0,66	0,16	0,85
0–360	10271	5,35	0,05	0,54	0,15	0,94
<i>Неустойчивая стратификация ($L < 0$)</i>						
0–15	861	0,58	0,10	0,11	0,047	0,86
15–30	352	0,21	0,16	0,04	0,027	0,90
30–45	285	1,53	0,31	0,17	0,152	0,91
45–60	217	1,32	0,17	0,29	0,121	0,90
60–75	222	4,89	1,22	0,12	0,399	0,88
75–90	663	4,98	0,22	0,49	0,340	0,96
90–105	939	4,30	0,14	0,62	0,418	0,96
105–120	674	0,76	0,07	0,51	0,113	0,94
120–135	975	0,68	0,05	0,28	0,054	0,93
135–150	1392	0,23	0,01	0,38	0,012	0,93
150–165	1574	0,83	0,07	0,11	0,051	0,94
165–180	1994	0,19	0,02	0,52	0,016	0,96
180–195	3707	0,14	0,02	0,55	–0,031	0,96
195–210	2901	0,14	0,01	0,44	0,006	0,94
210–225	3305	0,12	0,00	0,47	0,008	0,95
225–240	3693	0,19	0,01	0,57	0,023	0,97
240–255	2279	0,79	0,02	0,58	0,057	0,98
255–270	1594	0,40	0,02	0,63	0,042	0,97
270–285	1079	1,92	0,01	0,98	0,036	0,98
285–300	1414	0,57	0,03	0,41	0,062	0,97
300–315	2731	0,41	0,01	0,69	0,025	0,96
315–330	2818	0,84	0,01	0,76	0,022	0,93
330–345	2294	4,31	0,10	0,47	0,122	0,87
345–360	1158	7,92	0,26	0,46	0,208	0,85
0–360	39125	0,45	0,01	0,18	0,018	0,93

Согласно таблице величина $d_F(\varphi)$ изменяется в широких пределах как при устойчивой, так и при неустойчивой стратификации приземного слоя атмосферы. Аппроксимация по всем экспериментальным данным (без разделения по направлению ветра) при устойчивой стратификации приводит к выражению $D_F = 1 + 5,35|\xi|$, а при неустойчивой – к выражению $D_F = 1 + 0,45|\xi|$. Отметим, что отличие осредненных коэффициентов d_F в этих соотношениях от аналогичных параметров в формулах (3) и (4) обусловлено различием моделей E_n , в которые они входят. Величины параметра d_F в целом согласуются с результатами, публикуемыми другими авторами. Но невысокие значения коэффициента детерминации $k_F(\varphi_j)$ в некоторых диапазонах направления ветра требуют пользоваться полученными приближениями с определенной осторожностью.

Была проведена также аппроксимация экспериментальных данных функцией вида

$$[G(\varphi, \xi)]^{1/2} \Leftrightarrow D_L = 1 + d_L(\varphi)|\xi|,$$

соответствующей модели

$$E_n = E/u^2 \Leftrightarrow E_{Lm} = c_{Em}^2(\varphi)[1 + d_L|\xi|]^{2/3}.$$

Вычисленные при такой аппроксимации значения $d_L(\varphi_j)$ оказались существенно (примерно на порядок величины) меньше значений параметра $d_F(\varphi_j)$, а коэффициенты детерминации $k_L(\varphi_j)$ значительно выше коэффициентов $k_F(\varphi_j)$. Две последние колонки в таблице содержат значения $d_L(\varphi_j)$ и $k_L(\varphi_j)$.

Исходя из предположения, что показатель степени в соотношении (1) также может зависеть от направления ветра, была проведена аппроксимация экспериментальных данных двухпараметрической функцией вида

$$[G(\varphi, \xi)]^{1/2} \Leftrightarrow D_R = [1 + d_R(\varphi)|\xi|]^{\alpha(\varphi)},$$

соответствующей исходному соотношению (1). Одновременно определялись параметры $d_R(\varphi_j)$ и $\alpha(\varphi_j)$. Полученные результаты показали, что не в каждом диапазоне направлений ветра возможно применение подобной параметризации (коэффициенты детерминации в этих диапазонах имеют близкие к нулю или даже отрицательные значения). При этом стандартные ошибки вычисленных параметров $d_R(\varphi_j)$ и $\alpha(\varphi_j)$ довольно часто были сравнимы и даже превышали по величине сами параметры. Коэффициенты детерминации редко были выше значения 0,4, что говорит о недостаточной адекватности сделанных оценок. По этой причине более детально полученные результаты в статье не обсуждаются. Следует только отметить, что в тех диапазонах направления ветра, где аппроксимацию можно было провести, параметр $d_R(\varphi_j)$ изменялся примерно в том же диапазоне значений, что и параметр $d_F(\varphi_j)$. Совокупно по всем направлениям ветра средние значения \bar{d}_R составляли 2,06 для устойчивой и 0,19 для неустойчивой стратификации. Показатель степени $\alpha(\varphi_j)$ изменялся в диапазоне от 0,1 до 0,6 со

средними значениями (оценка по всем направлениям ветра) $\bar{\alpha} = 0,37$ при устойчивой и $\bar{\alpha} = 0,40$ при неустойчивой стратификации приземного слоя атмосферы.

Естественным итогом проведенных исследований должен быть вывод о том, какая из полученных моделей является наиболее приемлемой для пункта наблюдений, т.е. следует сравнить исходные экспериментальные данные с полученными моделями. Для сравнений требуется перейти от дискретных значений параметров $d_F(\varphi_j)$ и $d_L(\varphi_j)$ к их аналитическому представлению, как это было сделано ранее для параметра $c_E(\varphi_j)$.

Результаты анализа показали, что аппроксимировать дискретные значения $d_F(\varphi_j)$ и $d_L(\varphi_j)$ какой-либо одной функцией во всем диапазоне направлений ветра 0–360° не удастся. В этой связи нами выделялись отдельные секторы направления ветра, и в этих секторах производился подбор соответствующей аппроксимирующей функции. Такой порядок обработки применялся для всех комбинаций $d_F(\varphi_j)$ (или $d_L(\varphi_j)$) и типов стратификации. Критерием качества аппроксимации служил коэффициент детерминации. Из всех использованных при «подгонке» к экспериментальным данным функций выбиралась та, коэффициенты детерминации которых были максимальными. В большинстве случаев приемлемое качество аппроксимации достигалось использованием полиномов различной степени (от 3 до 9). Пример сопоставления исходных (дискретных) значений $d_F(\varphi_j)$ и $d_L(\varphi_j)$ с аппроксимирующими их функциями показан на рис. 4 в виде круговых диаграмм.

Полученные аппроксимирующие функции для параметров $d_F(\varphi_j)$ и $d_L(\varphi_j)$ позволили провести сравнение исследуемой экспериментальной величины $E_n = E/u^2$ с ее моделями E_{nm} . В результате установлено, что в целом нет особых преимуществ у той или иной из полученных моделей E_{nm} . Сравнение разверток во времени модельных и экспериментальных значений $E_n(t)$ показывает, что на некоторых интервалах времени имеется удовлетворительное совпадение сравниваемых величин, а на некоторых — неудовлетворительное. В качестве примера на рис. 5 приведен фрагмент развертки экспериментальных и модельных (E_{Fm} и E_{Lm}) значений нормированной КЭТ, а также модели E_{Fm} с постоянным (средним по всем направлениям ветра) параметром \bar{d}_F , разным для устойчивой ($\bar{d}_F = 5,35$) и неустойчивой ($\bar{d}_F = 0,45$) стратификации. Обозначим данный вариант модели как $E_{F,C}$.

Мерой качества применяемой модели может служить относительная ошибка δ_i (%), определяемая по формуле

$$\delta_i = 100 \frac{E_{nm} - E_{ne}}{E_{ne}}, \quad (5)$$

где E_{nm} и E_{ne} — соответственно экспериментальное и модельное значения в момент времени t_i .

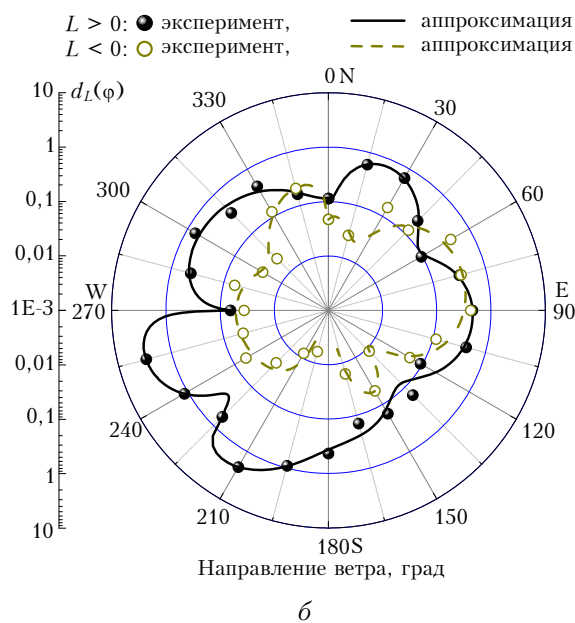
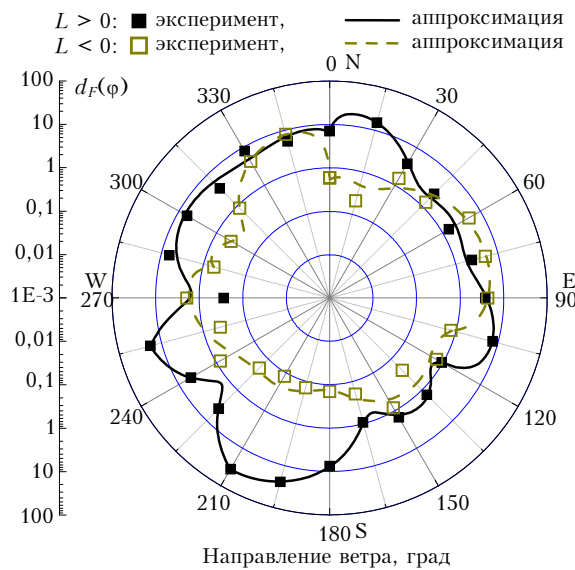


Рис. 4. Сравнение экспериментальных значений (символы) параметров $d_F(\varphi_j)$ (а) и $d_L(\varphi_j)$ (б) с аппроксимирующими их функциями (линии) для устойчивой (сплошные символы) и неустойчивой (открытые символы) стратификации

Оценки ошибок δ_i для моделей

$$E_{Fm} = c_{Em}^2 [1 + d_F |\xi|]^{2/3} \text{ и } E_{Lm} = c_{Em}^2 [1 + d_L |\xi|]^2$$

показали, что хорошее согласование экспериментальных данных с модельными (считаем, что это отвечает неравенству $|\delta_i| \leq 10\%$) реализуется примерно в 20–25% времени наблюдений, а удовлетворительное ($|\delta_i| \leq 20\%$) — примерно в 40–45% времени. Вычисления δ_i отдельно для условий $|L| > 100$, $0 \leq L \leq 100$ и $-100 \leq L < 0$ показали, что качество полученных моделей практически не зависит от типа стратификации. Для примера на рис. 6 представлены гистограммы распределения ошибок δ_i , вычисленных для моделей E_{Fm} и $E_{F,C}$.

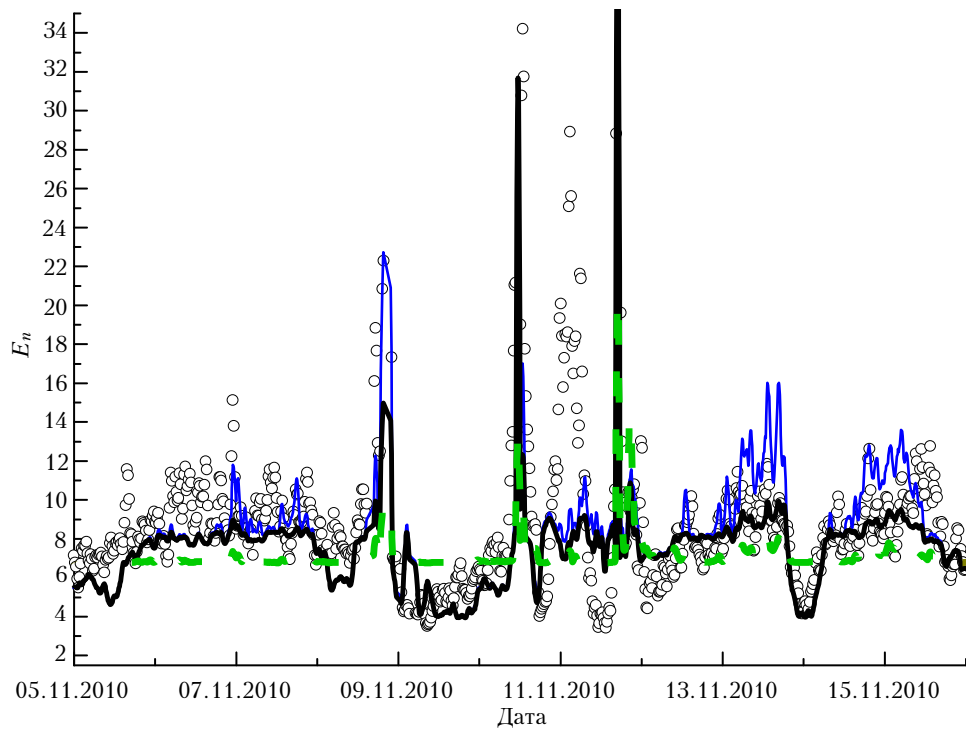


Рис. 5. Сравнение экспериментальных значений нормированной КЭТ (символы) с модельными значениями E_{Fm} (сплошная тонкая линия), E_{Lm} (сплошная толстая линия) и $E_{F,C}$ (штриховая линия)

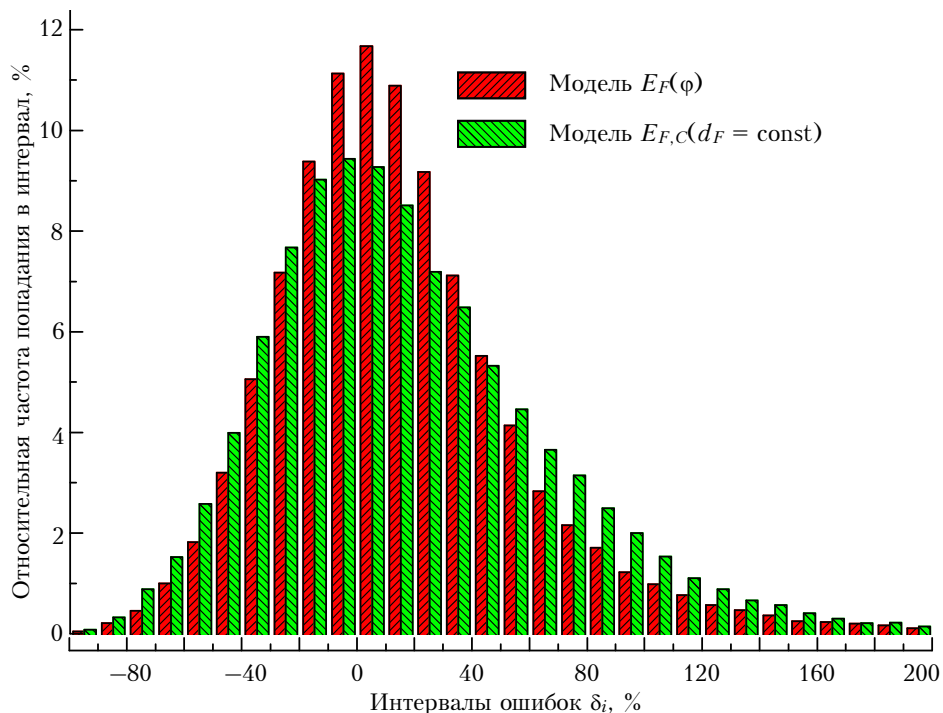


Рис. 6. Гистограммы распределения ошибок δ_i , вычисленных для моделей E_{Fm} и $E_{F,C}$

Очевидно, что учет зависимости параметра d_F от направления ветра улучшает качество подгонки к экспериментальным данным, но все же не обеспечивает достаточную степень достоверности модели нормированной КЭТ. Мы полагаем, что модели статистических характеристик турбулентности в при-

земном слое атмосферы, пригодные для дальнейшего использования, должны обеспечивать выполнение условия $|\delta_i| \leq 10\%$ не менее чем в 50% и условия $|\delta_i| \leq 20\%$ не менее чем в 80% времени наблюдения.

Следует отметить, что хорошее согласование модели $E_{Fm} = c_{Em}^2 [1 + d_F |\xi|]^{2/3}$ с экспериментальными

данными не определяется какими-либо четкими условиями. Например, нельзя утверждать, что в диапазоне скоростей ветра от X_1 до X_2 (м/с) и в диапазоне направлений ветра от Y_1 до Y_2° при неустойчивой (или устойчивой) стратификации модель всегда обеспечивает хорошее согласование с экспериментальными данными. Проведенный анализ показал, что какие бы комбинации условий ни рассматривались, ошибки модели δ_i могут быть как большими, так и маленькими. Функция распределения ошибок δ_i в различных комбинациях условий различна. Но нигде процент «хороших» ошибок не бывает подавляющим. Естественно, сделанный вывод касается только конкретного места проводившихся наблюдений.

Невысокий процент согласованности экспериментальных данных и моделей E_n в форме (1) над урбанизированной территорией требует проведения дальнейших исследований, направленных на изучение зависимости E_n не только от текущей стратификации и направления ветра, но и от других характеристик. Результаты анализа зависимости параметров c_E и d_F (или d_L) от скорости ветра показали, что эта зависимость слабая и не может объяснить имеющиеся расхождения между экспериментальными и модельными оценками E_n . По-видимому, при построении моделей нормированной кинетической энергии турбулентности следует учитывать более «тонкую» структуру поля турбулентности в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией, например, учитывать свойства смешанных моментов $\overline{u'w'}$ и $\overline{v'w'}$, формирующих величину динамической скорости u^* .

Подводя итог, можно сделать следующие выводы. В условиях урбанизированной территории нормированная на квадрат динамической скорости кинетическая энергия турбулентности $E_n = E / u^{*2}$

зависит от направления ветра. Эта зависимость может быть параметризована аналитическими выражениями. Для построения адекватной модели E_n требуется учитывать не только направление ветра и тип текущей стратификации приземного слоя атмосферы, но и другие характеристики потока ветра.

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

1. *Rotach M.W.* Turbulence close to a rough urban surface. Part II: variances and gradients // *Boundary-Layer Meteorol.* 1993. V. 66, N 1–2. P. 75–92.
2. *Al-Jiboori M.H., Xu Y., Qian Y.* Local similarity relationship in the urban boundary layer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2002. V. 102, N 1. P. 63–82.
3. *Quan L., Hu F.* Relationship between turbulent flux and variance in the urban canopy // *Meteorol. and Atmos. Phys.* 2009. V. 104, N 1–2. P. 29–36.
4. *Мамышева А.А., Одинцов С.Л.* Экспериментальная оценка кинетической энергии турбулентности в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 817–827.
5. *Rotach M.W.* Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon // *Atmos. Environ.* 1995. V. 29, N 13. P. 1773–1486.
6. *Hanna S., White J., Zhou Y.* Observed winds, turbulence, and dispersion in built-up downtown areas of Oklahoma City and Manhattan // *Boundary-Layer Meteorol.* 2007. V. 125, N 3. P. 441–468.
7. *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.
8. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 264 с.
9. *Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1991. 400 с.

A.A. Mamyshева, S.L. Odintsov. Analysis of the normalized kinetic energy of turbulence as a function of wind direction and type of stratification in the atmospheric surface layer over an urban territory.

The paper discusses results of analysis of the kinetic energy of turbulence (E_n) normalized to the friction velocity in the atmospheric surface layer over an urban territory. Field measurements are used to study E_n dependence on the wind direction and type of stratification. Different models of E_n are considered and compared with experimental data. It is found that the use of E_n models fails to provide the proper simulation quality under the conditions that took place during the field measurements. It is supposed that for the adequate simulation of E_n one should take into account not only the mean wind direction and the type of current stratification, but also other wind flow characteristics.