

ГЛАВА 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА

5.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

5.1.1 Определения

В этой главе используются следующие определения (более подробную информацию см. в Mazzarella, 1972):

Скорость ветра. Трехмерная векторная величина со случайными мелкомасштабными колебаниями в пространстве и времени, наложенными на крупномасштабный организованный поток. Такое определение ветра используется, например, применительно к анализу загрязнения воздуха и при обеспечении посадки самолетов. Однако для целей настоящего Руководства приземный ветер будет рассматриваться в основном как двумерная векторная величина, заданная двумя числовыми значениями, характеризующими направление и скорость. Короткопериодные пульсации ветра характеризуют его порывистость, а индивидуальные пульсации называются порывами.

Большинству пользователей информации о ветре требуется осредненный горизонтальный ветер, обычно представленный в полярной системе координат значениями скорости и направления. Во все большем количестве областей применения данных о ветре требуется информация об изменчивости или порывистости ветра. С этой целью используются три параметра, а именно: максимальный порыв и средние квадратические отклонения скорости и направления ветра.

Усредненные величины. Значения (например, горизонтальной скорости ветра), которые осредняются за период времени от 2 до 60 мин. В этой главе мы имеем дело преимущественно с осреднением за период времени 10 мин, что необходимо для целей прогноза. Климатические обобщения обычно требуют осреднения за полный час или сутки. Для аэронавигационных целей часто используются более короткие периоды осреднения (см. том III, глава 2 настоящего Руководства). Периоды осреднения менее нескольких минут не в достаточной мере сглаживают естественные турбулентные пульсации ветра, поэтому значения ветра, осредненные за 1 мин, следует рассматривать как длительный порыв ветра.

Пиковый порыв ветра. Максимальная наблюдаемая скорость ветра за определенный интервал времени. В ежечасных сводках погоды пиковый порыв представляет собой предельное значение скорости ветра за последний полный час.

Продолжительность порыва. Мера длительности максимального наблюдаемого порыва. Продолжительность порыва определяется чувствительностью измерительного устройства. Медленно срабатывающие устройства сглаживают экстремальные значения и измеряют продолжительные сглаженные порывы; быстро срабатывающие устройства могут регистрировать резкие порывы малой продолжительности на фронте волны.

Для определения продолжительности порыва используется идеализированная измерительная цепочка, а именно единичный фильтр скользящего осреднения колебаний ветра на интервале t_0 секунд. Максимальные значения ветра, полученные на выходе такого фильтра, считаются максимальными порывами продолжительностью t_0 . Считается, что другие измерительные системы с различными фильтрующими элементами пригодны для измерения порывов продолжительностью t_0 в том случае, если фильтр скользящего осреднения на интервале t_0 выдает такое же экстремальное значение (подробности см. в Beljaars, 1987; WMO, 1987).

Среднее квадратическое отклонение.

$$s_u = \sqrt{(u_i - U)^2} = \sqrt{\left(\left(\sum (u_i^2) - (\sum u_i)^2 / n \right) / n \right)} \quad (5.1)$$

где u — это изменяющаяся во времени величина (например, горизонтальная скорость ветра) со средним значением U , а верхняя черта означает временное осреднение выборки из n значений u_i . Среднее квадратическое отклонение используется для характеристики колебаний конкретной величины.

Постоянная времени (системы первого порядка). Время, необходимое для того, чтобы прибор обнаружил и выдал информацию примерно о 63 % ступенчатого изменения сигнала.

Длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика. Приблизительное расстояние (в метрах), которое проходит воздушный поток до того, как на выходе датчик ветра покажет примерно 63 % ступенчатого изменения входной скорости ветра.

Критическое затухание (для датчика, такого как флюгарка, чувствительность которого наилучшим образом описывается дифференциальным уравнением второго порядка). Значение затухания, при котором датчик наиболее быстро воспроизводит ступенчатое изменение характеристики при отсутствии выброса в показании.

Степень затухания. Отношение истинного затухания к критическому затуханию.

Длина естественной незатухающей волны. Расстояние, которое проходит воздушный поток, необходимое для прохождения флюгаркой одного периода колебания в условиях отсутствия затухания. Оно меньше реальной «затухающей» длины волны в $\sqrt{1-D^2}$ раз, где D — степень затухания.

Неустойчивый ветер, не имеющий среднего направления. Ветер, при котором полная изменчивость среднего направления ветра в течение 10 мин составляет не менее 60° , но не достигает 180° , а скорость ветра составляет менее $1,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (3 уз), или когда общая изменчивость равна или превышает 180° .

5.1.2 Единицы и шкалы измерения

Скорость и направление ветра в случае включения в синоптические сводки должны осредняться за интервал не менее 10 мин. Для аэронавигационных целей могут потребоваться средние значения за более короткий период времени (см. том III, глава 2 настоящего Руководства).

Направление ветра определяется как направление, откуда дует ветер, и измеряется по часовой стрелке от географического севера, точнее истинного севера (на основе ВГС-84 и ее ГМЗ-96).

Термин «штиль» должен применяться в том случае, когда средняя скорость ветра меньше или равна $0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (< 1 уз). В этом случае направление ветра кодируется 00.

Направление ветра на станциях, лежащих в пределах 1° от Северного полюса или 1° от Южного полюса, должно измеряться таким образом, чтобы ноль азимутного круга совпадал с 0° по Гринвичскому меридиану.

5.1.3 Метеорологические требования

Наблюдения за ветром требуются для мониторинга и прогноза погоды, для климатологических обобщений ветровых нагрузок, для оценки вероятности ущерба от сильного ветра и оценки энергии ветра, а также в качестве составной части оценки

приземных потоков, например, для оценки испарения в интересах сельскохозяйственного производства и определения распространения загрязнения воздуха. Необходимые требования к измерениям приведены в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A. Требуемая неопределенность измерения для горизонтальной скорости $0,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ниже $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и более чем на 10 % выше $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ обычно достаточна. Направление ветра должно измеряться с неопределенностью до 5° . Кроме средних значений скорости и направления ветра, для многих применений требуются данные о среднем квадратическом отклонении и экстремальных значениях (см. 5.8.2). Современные приборы позволяют без особых усилий получить необходимую неопределенность измерений. Наиболее трудным моментом при проведении наблюдений за ветром является выбор места размещения анемометра. Так как почти невозможно найти место, где скорость ветра является репрезентативной для большой территории, рекомендуется оценить погрешности, обусловленные нерепрезентативностью места размещения анемометра (требования по размещению и установке приводятся в 5.9 и в данном томе, глава 1, приложение 1.D).

Для многих применений требуется информация о порывистости ветра. Она необходима для сверхкраткосрочных прогнозов метеорологических условий при взлете и посадке самолетов, климатических обобщений значений ветровой нагрузки, расчета распространения загрязнения воздуха и корректировки размещения анемометров. Требованиям рутинных наблюдений удовлетворяют два параметра, а именно: средние квадратические отклонения направления и скорости ветра и максимальный порыв при трехсекундном осреднении (см. рекомендации 3 и 4 (КПМН-Х) (ВМО, 1990)).

5.1.4 Методы измерения и наблюдения

Скорость приземного ветра может быть измерена с помощью флюгера и чашечного или крыльчатого анемометра. В тех случаях, когда приборы временно не функционируют или их нет в наличии, направление и силу ветра можно определять субъективно (в таблицах 5.1 и 5.2 приводятся эквиваленты скорости ветра для повседневного использования при оценках).

Рассматриваемые здесь приборы и методы измерений — это лишь некоторые более подходящие из возможного набора. В конце этой главы приведен достаточно полный список литературы по данному вопросу.

Датчики, кратко описанные ниже, — это вращающиеся чашечные и крыльчатые анемометры, а также флюгеры для измерения направления ветра. Чашечная вертушка и флюгер, лопастная вертушка и флюгер и просто крыльчатые вертушки — наиболее часто встречающиеся комбинации. Другие датчики, как например трубка Пито, реже используются для проведения стандартных наблюдений, хотя также могут давать удовлетворительные результаты. Приборы, находящиеся на стадии разработки или применяемые в настоящее время для исследовательских целей, с развитием техники могут найти практическое применение при стандартных наблюдениях.

Почти для всех применений, необходимо измерять средние значения скорости и направления ветра. Во многих случаях требуются данные о порывах ветра. Таким образом, любая ветроизмерительная система состоит не только из датчика, но также из блоков обработки и записи. Обработка предназначена для осреднения и расчета средних квадратических отклонений и экстремумов. В простейшем случае обработка может состоять из записи характеристик ветра перьевым самописцем и оценки среднего и экстремального значений при считывании записи.

5.2 ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЕТРА

При отсутствии приборов для измерения ветра его следует оценивать визуально. При такой оценке ошибки могут быть довольно значительными, но если пользоваться данными наблюдений с осторожностью, то этот метод может быть оправдан, поскольку он дает

Таблица 5.1. Эквиваленты скорости ветра

Баллы по шкале Бофорта и описание	Скорость ветра на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью				Признаки для оценки скорости ветра над сушей
	(узлы)	(м·с ⁻¹)	(км·ч ⁻¹)	(миль·ч ⁻¹)	
0 Штиль	< 1	0–0,2	< 1	< 1	Безветренно, дым поднимается вертикально
1 Маловетрие	1–3	0,3–1,5	1–5	1–3	Направление ветра определяется по сносу дыма, но не по флюгеру
2 Легкий	4–6	1,6–3,3	6–11	4–7	Ветер ощущается лицом; листья шелестят; ветер приводит в движение обычный флюгер
3 Слабый	7–10	3,4–5,4	12–19	8–12	Листья и тонкие ветки деревьев все время колышутся, ветер развеивает легкие флаги
4 Умеренный	11–16	5,5–7,9	20–28	13–18	Ветер поднимает пыль и обрывки бумаги, приводит в движение тонкие ветки деревьев
5 Свежий	17–21	8,0–10,7	29–38	19–24	Небольшие деревья с листвой качаются, на воде внутренних водоемов появляются небольшие волны с гребнями
6 Сильный	22–27	10,8–13,8	39–49	25–31	Качаются толстые ветви деревьев, гудят телеграфные провода, зонты удерживаются с трудом
7 Крепкий	28–33	13,9–17,1	50–61	32–38	Качаются стволы деревьев, идти против ветра трудно
8 Очень крепкий	34–40	17,2–20,7	62–74	39–46	Ветер ломает ветви деревьев, препятствует движению
9 Шторм	41–47	20,8–24,4	75–88	47–54	Небольшие повреждения (ветер срывает оголовники дымовых труб и черепицу)
10 Сильный шторм	48–55	24,5–28,4	89–102	55–63	На суше бывает редко, деревья вырывает с корнями, значительные разрушения строений
11 Жестокий шторм	56–63	28,5–32,6	103–117	64–72	Наблюдается очень редко, сопровождается широкомасштабными разрушениями
12 Ураган	64 и более	32,7 и более	118 и более	73 и более	

Таблица 5.2. Эквиваленты скорости ветра для арктических районов и районов без растительности

<i>Баллы по шкале Бофорта и описание</i>	<i>Скорость ветра на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью</i>				<i>Признаки для оценки скорости ветра для арктических районов и районов без растительности</i>
	<i>(узлы)</i>	<i>(м·с⁻¹)</i>	<i>(км·ч⁻¹)</i>	<i>(миль·ч⁻¹)</i>	
0 Штиль	< 1	0–0,2	< 1	< 1	
1 Маловетрие	1–3	0,3–1,5	1–5	1–3	Ветер не ощущается. Дым поднимается вертикально
2 Легкий	4–6	1,6–3,3	6–11	4–7	Ветер ощущается лицом, листья шелестят
3 Слабый	7–10	3,4–5,4	12–19	8–12	Ветер шевелит волосы, колыхает одежду
4 Умеренный	11–16	5,5–7,9	20–28	13–18	Ветер поднимает пыль и бумажный мусор, перепутывает волосы
5 Свежий	17–21	8,0–10,7	29–38	19–24	Сила ветра ощущается туловищем. Предел приемлемого ветра на суше
6 Сильный	22–27	10,8–13,8	39–49	25–31	Некоторые неудобства при ходьбе
7 Крепкий	28–33	13,9–17,1	50–61	32–38	Трудно идти против ветра
8 Очень крепкий	34–40	17,2–20,7	62–74	39–46	Трудно удерживать равновесие при ходьбе
9 Шторм	41–47	20,8–24,4	75–88	47–54	Опасность быть снесенным ветром
10 Сильный шторм	48–55	24,5–28,4	89–102	55–63	Деревья вырывает с корнем, значительный ущерб сооружениям
11 Жестокий шторм	56–63	28,5–32,6	103–117	64–72	
12 Ураган	64 и более	32,7 и более	118 и более	73 и более	

данные, которые в противном случае не могли бы быть получены вообще. В тех случаях, когда на какой-либо станции данные о ветре временно или постоянно были получены путем оценивания, а не измерения, этот факт должен быть занесен в журнал наблюдений станции и стать известным пользователям.

5.2.1 Скорость ветра

Оценки основываются на влиянии ветра на подвижные предметы. Можно использовать почти все предметы, способные свободно перемещаться под влиянием ветра, но лучше всего воспользоваться признаками, содержащимися в описании шкалы силы ветра Бофорта, приведенной в таблицах 5.1 и 5.2.

При оценке скорости ветра наблюдатель (и подвижный предмет) должен находиться на открытой ровной местности как можно дальше от препятствий. Необходимо помнить, что даже небольшие препятствия вызывают серьезные изменения скорости ветра и отклонения в его направлении, особенно с их подветренной стороны.

5.2.2 **Направление ветра**

В случае отсутствия или неисправности приборов направление следует оценивать по направлению движения дыма из высокой трубы, движению листьев и т. д. на открытом месте, либо наблюдая за указателем направления или вымпелом, прикрепленным к высокому флагштоку. Кроме того, в аэропорту может быть использован ветровой конус, если скорость ветра достаточна для приведения его в движение.

Какое бы из этих средств не использовалось, возможны ошибки, обусловленные перспективой, если наблюдатель не стоит непосредственно под указателем ветра. Следует быть осторожным, чтобы ошибочно не принять местные вихри, образуемые сооружениями и т. д., за генеральное направление ветра.

На открытой местности направление приземного ветра можно определить довольно точно, если стать к нему лицом. При этом не следует учитывать направление движения облаков, какими бы низкими они ни были.

5.2.3 **Пульсации ветра**

Не следует проводить оценку максимальных порывов или средних квадратических отклонений при отсутствии надлежащих приборов и регистрирующих устройств.

5.3 **ПРОСТЫЕ МЕТОДЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Те станции, на которых нет возможности установить традиционные анемометры, можно обеспечить любыми недорогими простыми приборами, которые позволят сделать наблюдения несколько более надежными, чем те, которые выполнены без помощи приборов.

5.3.1 **Скорость ветра**

В случае применения простых ручных анемометров, их следует настраивать и снимать с них показания в соответствии с инструкциями изготовителя. Наблюдения следует проводить в месте, открытом воздействию ветра, а не с подветренной стороны препятствий, таких как здания, деревья и холмы. При отсутствии такой возможности место для наблюдения должно быть достаточно удалено от препятствий, а именно на расстояние, по меньшей мере в 10 раз превышающее высоту самого препятствия. В случае расположения места наблюдения с наветренной стороны или в стороне от препятствия, удаление от него должно по меньшей мере двукратно превышать его высоту.

5.3.2 **Направление ветра**

Направление ветра можно оценивать по флюгеру (или вымпелу), установленному на столбе, к которому прикреплены указатели основных румбов компаса. Наблюдения за флюгером проводятся снизу, а направление ветра можно оценивать с точностью до 16-й доли азимутального круга. Если флюгер колеблется на ветру, то определяется среднее направление ветра в пределах его колебаний.

5.4 **ЧАШЕЧНЫЕ И КРЫЛЬЧАТЫЕ АНЕМОМЕТРЫ**

Для измерения скорости ветра используются чашечные и крыльчатые анемометры, которые состоят из двух узлов: вертушки и генератора сигнала. В хорошо сконструированных системах угловая скорость чашечной или крыльчатой вертушки

прямо пропорциональна скорости ветра или, в случае крыльчатой вертушки, составляющей скорости ветра, параллельной оси вращения. Кроме того, в таких хорошо сконструированных анемометрах калибровочная кривая линейна, не зависит от плотности воздуха, имеет устойчивое нулевое значение и диапазон изменчивости, легко воспроизводится в заводских условиях. Вблизи порога чувствительности, или при скорости ветра менее $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, калибровочная кривая чашечных анемометров может существенно отклоняться от линейной для случаев, когда длина штыря, соединяющего чашку с осью вращения, значительно больше диаметра чашки (Patterson, 1926).

Характеристикой реакции датчиков чашечного и крыльчатого типа на изменение скорости ветра является длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика, величина которого прямо пропорциональна моменту инерции вертушки и, кроме того, зависит от ряда геометрических параметров (Busch and Kristensen, 1976; Coppin, 1982).

Большинство датчиков скорости ветра чашечного и крыльчатого типа реагируют быстрее на увеличение скорости ветра, чем на ее уменьшение, поэтому эти вертушки завышают фактическую среднюю скорость ветра. Более того, колебания вертикальной компоненты скорости могут также привести к завышению скорости чашечными анемометрами в результате ослабления взаимодействия чашки с наклоненным к горизонту потоком (MacCready, 1966). Общее завышение скорости может составлять 10 % для некоторых конструкций и при высокой турбулентности ветрового потока (для чашечного анемометра на высоте 10 м с расстоянием отклика 5 м над крайне неоднородной поверхностью; Coppin, 1982). Этот недостаток можно свести к минимуму путем использования анемометров с быстрым откликом (малой инерцией) — либо чашечных анемометров с хорошей реакцией на наклонный к горизонту поток, либо крыльчатых анемометров, которые, фактически, не реагируют на вертикальную составляющую скорости. В случае, когда нет возможности исследовать характеристики анемометра в аэродинамической трубе, можно провести его сверку с поверенным прибором в полевых условиях (Albers et al., 2000).

Поскольку и чашечные, и крыльчатые вертушки вращаются с угловой скоростью, прямо пропорциональной скорости ветра или его компоненту вдоль оси вращения, они особенно удобны для приведения в действие генераторов сигнала различной конструкции. Применяются генераторы сигнала переменного и постоянного тока, оптические и магнитно-импульсные генераторы, счетчики оборотов, а также самописцы (WMO, 2001). Выбор генератора сигналов или датчика в значительной степени зависит от используемого средства обработки и способа считывания данных. Необходимо принять меры для того, чтобы подшипники и генераторы сигналов характеризовались низкими начальным и вращающим моментами трения, а также чтобы момент инерции генератора сигнала не приводил бы к росту времени реакции анемометра на изменение скорости потока. В случае передачи генерированного датчиком электрического сигнала на большое расстояние, он ослабевает за счет сопротивления кабеля, что делает использование импульсного сигнала более предпочтительным, поскольку он не столь подвержен изменениям при передаче на расстояние.

Требуемые и реально достижимые характеристики датчиков скорости ветра приведены в настоящем том, глава 1, приложение 1.А.

5.5 ФЛЮГЕРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Для получения удовлетворительных результатов измерений может быть целесообразным использовать флюгер, который должен быть сбалансирован таким образом, чтобы он не стремился занять какую-либо предпочтительную позицию в случае, если его ось отклонится от вертикали. Желательно, чтобы элементы оперения флюгера были параллельны его оси, поскольку флюгер с двумя элементами оперения, располагающимися под углом более 10° к его оси, имеет два устойчивых положения, каждое из которых существенно отличается от действительного направления ветра (Wieringa and van Lindert, 1971).

Реакция обычного флюгера с докритическим затуханием на резкое изменение направления ветра обычно характеризуется поворотом на угол, превышающий угол реального поворота ветра, с дальнейшими колебаниями вблизи истинного направления ветра, при этом амплитуда колебаний экспоненциально уменьшается со временем. Для описания такой реакции используются два параметра: «естественная частота колебаний с докритическим затуханием» или «длина волны» и «степень затухания» (т. е. отношение истинного затухания к критическому) (MacCready, 1966; Mazzarella, 1972). Степень затухания в пределах от 0,3 до 0,7 считается удовлетворительной, поскольку при этом не возникают слишком большие отклонения направления флюгера от реального направления ветра, а реакция флюгера остается достаточно быстрой (Wieringa, 1967). Само собой разумеется, что в тех случаях, когда необходимо рассчитать среднее за длительный период на основе данных, полученных для короткого временного интервала, могут быть использованы датчики с меньшей степенью затухания.

Генератор сигнала представляет собой, в сущности, преобразователь угол–код. Используется несколько видов генератора сигнала, такие как потенциометры, сельсины переменного и постоянного тока, цифровые дисковые преобразователи угол–код, угломерные круги прямого считывания, поворотные переключатели. Выбор генератора сигнала в основном зависит от используемого средства обработки и способа считывания данных. Необходимо принимать меры для того, чтобы подшипники флюгарки и генератора характеризовались низкими значениями трения покоя и вращения. Простейший метод записи сигнала состоит в том, что перо самописца медленно перемещается сверху вниз по листу бумаги, обмотанному вокруг цилиндра, вращающемуся вместе с осью флюгера.

Абсолютная точность измерения направления ветра зависит также от тщательности, с которой прибор ориентирован относительно истинного севера. Требуемые и реально достижимые характеристики флюгеров для измерения направления ветра приведены в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A.

5.6 ДРУГИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРА

Для измерения направления и скорости ветра можно использовать множество физических принципов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Некоторые системы были разработаны для конкретных целей, таких как измерение мелкомасштабных пульсаций и исследование загрязнения воздуха (см., например, Smith (1980)). При этом используются следующие нестандартные типы датчиков:

- a) Анемометры, основанные на принципе трубки Пито, измеряющей избыточное давление в трубке, ориентируемой по направлению ветра с помощью флюгера (см. описание анемометра Динеса в Gold (1936) и WMO (1984a)). Линеализованная система регистрации Динеса решает проблему осреднения скорости, вызванную параболической формой уравнения связи между скоростью ветра и давлением, а также обеспечивает запись данных о порывах без использования электроэнергии.
- b) Акустические анемометры, измеряющие время между излучением и приемом ультразвукового импульса, распространяющегося вдоль фиксированного отрезка (Kaimal, 1980). Поскольку акустические анемометры, в силу физических принципов их работы, не содержат движущихся элементов, они отличаются большим временем службы и сравнительно медленным ухудшением точности измерений со временем.
- c) Анемометры с горячим диском — это твердотельные приборы, измеряющие градиент температуры внутри чипа. Это позволяет получить как скорость, так и направление ветра при неопределенностях в рамках спецификаций, приведенных в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A (van Oudheusden and Huijsing, 1991; Makinwa et al., 2001). Они прочны и имеют устойчивую во времени калибровку, но опыт их применения пока ограничен.

- d) Анемометры с горячей нитью измеряют степень охлаждения тонкой разогретой нити. В рабочем плане они довольно ненадежны как из-за своей чрезмерной хрупкости, так и из-за того, что их калибровка довольно быстро меняется в условиях загрязненной или влажной окружающей среды. Их не рекомендуется использовать при выпадении осадков.
- e) Устаревшие флюгеры с качающейся доской ненамного лучше полного отсутствия приборов.
- f) Технологии дистанционного зондирования поля ветра с помощью звуковых (сонар), световых (обнаружение света и дальность (лидар)) или электромагнитных (радар) волн менее распространены в обычных метеорологических сетях. Они подробно описаны в томе III, глава 5 настоящего Руководства и в работе Lenschow (1986).

5.7 ДАТЧИКИ И ИХ КОМБИНАЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕТРА

Крыльчатые вертушки, которые чувствительны только к составляющей скорости ветра, параллельной оси вращения вертушки, можно располагать перпендикулярно друг другу, что дает возможность получать два показания, прямо пропорциональных ортогональным составляющим вектора ветра. Другие датчики, такие как двухосный акустический анемометр, выполняют ту же функцию за счет более сложных дополнительных электронных блоков. Недостаток ортогонально-ориентированных крыльчатых вертушек состоит в том, что трудно достичь т. н. косинусоидального разрешения (т. е. чувствительность непосредственно к составляющей ветра). При вычислении компонентов ветра по результатам измерения скорости и направления ветра в качестве устройств для измерения составляющих ветра можно также использовать комбинацию чашечный анемометр–флюгер или крыльчатый анемометр с флюгаркой.

5.8 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Данные измерений с помощью комбинаций анемометра и флюгера могут обрабатываться и осредняться самыми различными способами. Прежде чем рассматривать особенности полной цепочки измерения параметров ветра (установка датчика, измерения, передача, фильтрация, регистрация и обработка данных), полезно обсудить вопрос осреднения. В настоящей главе рассматриваются следующие результаты измерения ветра: осредненные значения параметров горизонтального ветра (составляющие или скорости/направление), средние квадратические отклонения и максимальный порыв.

5.8.1 Осреднение

Осреднение векторов ветра или его составляющих — в принципе задача несложная, но здесь имеется ряд трудностей. Во-первых, осреднение всех мгновенных значений скорости ветра дает небольшое (обычно на несколько процентов) завышение средней векторной скорости ветра U (MacCready, 1966; Wieringa, 1980a). При необходимости это различие можно скорректировать в случае, если определяется среднее квадратическое отклонение ветра s_d ; соотношение между U и средними значениями составляющих ветра равно (Frenkiel, 1951):

$$U / \sqrt{(u_i^2 + v_i^2)} = 1 - s_d^2 / 2 \quad (5.2)$$

Это влияние ортогональных к среднему направлению ветра турбулентных пульсаций часто путают с завышением скорости, вызывающей искажения в значениях среднего квадратического отклонения s_u (см. 5.4).

Во-вторых, это отсутствие непрерывности направления ветра между 0° и 360° . Эта проблема решается путем осуществления записи на цилиндр или расширения диапазона регистрации, например до 540° (при этом электронное устройство производит переключение диапазона с 0° до 360° и с 540° до 180°), либо путем использования компьютерной программы, которая в случае необходимости позволяет сделать последовательные серии измерений непрерывными путем прибавления или вычитания 360° . Скорость реакции чашечного анемометра и флюгера несопоставимы, поскольку чашечный анемометр обладает чувствительностью первого порядка, а флюгер — чувствительностью второго порядка. Эта проблема, однако, не существенна, поскольку различия в чувствительности проявляются только в высокочастотной части спектра пульсаций ветра.

С точки зрения теории, предпочтительнее осреднять составляющие ветра, нежели измеренные независимо друг от друга его скорость и направление. Однако различия очень незначительны, и для большинства применений средние значения составляющих ветра можно легко получить из средних значений его скорости и направления. Это также относится к соответствующим средним квадратическим отклонениям. С технической точки зрения, по целому ряду соображений предпочтение следует отдать независимой обработке значений скорости и направления. Во-первых, обработка данных о скорости и направлении ветра являются независимыми друг от друга, что позволяет продолжать работу с одним прибором в случае, если другой выходит из строя. Во-вторых, такой тип обработки данных проще, чем в случае, когда нужно вычислять составляющие ветра. Наконец, независимая обработка значений скорости и направления ветра позволяет получить данные в формате, широко применяемом в практических целях (включая кодирование по SYNOP и SHIP).

Средние значения горизонтальной составляющей скорости ветра могут быть получены с помощью различных приборов — как механических, так и электрических. Вероятнее всего, самым простым из них является счетчик оборотов чашечного анемометра, который, как правило, используется для оценки скорости ветра за определенный промежуток времени. На другом конце линейки сложности находятся электроимпульсные генераторы, управляющие специализированными процессорами, которые легко вычисляют средние значения, максимальные порывы и средние квадратические отклонения.

Если скорость и направление ветра регистрируются в виде непрерывного графика, то наблюдатель может оценивать десятиминутные средние значения этих параметров достаточно точно по записи пера регистратора. Эту же запись можно также использовать для считывания максимальных порывов ветра. Использование для наблюдений цифровых дисковых преобразователей или других измерительных приборов позволяет получить представление о скорости и изменчивости ветра, но приводит к значительным ошибкам при получении средних значений. Мгновенные отсчеты, таким образом, менее подходят для тех случаев, когда требуются десятиминутные средние значения для стандартных сводок погоды.

5.8.2 Максимальные порывы и средние квадратические отклонения

Результаты вычислений или регистрации пульсаций ветра предельно чувствительны к характеристикам реакции — динамическим характеристикам — всех элементов измерительной цепочки, включая такие параметры датчиков, как длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика и степень затухания. Кроме того, динамические характеристики всей системы в целом определяют продолжительность измеряемых максимальных порывов, как это описано в 5.1.1. Медленно реагирующие системы сглаживают экстремумы и регистрируют длительные порывы с малой амплитудой, а высокочувствительные системы — высокие и узкие пики скорости (порывы малой продолжительности). Ясно, что динамические характеристики систем для измерения параметров ветра следует тщательно проектировать с тем, чтобы получать данные о порывах, сопоставимые с данными регистрации на других станциях, а также получать точные и надежные значения средних квадратических отклонений.

Прежде чем задать динамические характеристики систем для измерения параметров ветра, необходимо определить минимальную регистрируемую продолжительность порыва с учетом требований пользователя. Экстремальные значения параметров ветра в основном используются для подготовки предупреждений об опасных явлениях, а также для климатологических обобщений экстремальной нагрузки на здания, сооружения и самолеты. Важно понимать, что кратковременные порывы ни по времени, ни по горизонтальной протяженности не способны в полной мере оказать разрушающее воздействие на большие сооружения. Согласно заключению ВМО (WMO, 1987) данные о порывах ветра продолжительностью три секунды удовлетворяют требованиям большинства потенциальных пользователей. При сильном ветре порывы ветра продолжительностью около трех секунд соответствуют «пробегу ветра» (продолжительность порыва, умноженная на среднюю скорость ветра) от 50 до 100 м. Этого достаточно для того, чтобы разрушить сооружения характерного размера для пригорода/города или подвергнуть их максимальной нагрузке от потенциально разрушительного порыва.

Стандартное отклонение направления и скорости ветра можно легко вычислить для выборки с интервалом около одной секунды с помощью микропроцессорного оборудования. Частота выборки не должна быть слишком большой, поскольку датчик сам по себе сглаживает ветер в пределах длины пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика (Wieringa, 1980b). В большинстве случаев достаточна частота выборки в 0,25 Гц, но это зависит от длины пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика и скорости ветра. Теоретические основы определения частоты выборки подробно рассмотрены в томе V, глава 2 настоящего Руководства.

Одновременное вычисление среднего квадратического отклонения горизонтальной составляющей ветра за 10 мин совместно с выявлением порывов ветра с продолжительностью в несколько секунд предъявляет интересные требования к электронным фильтрам. Характеристики регистрируемых порывов особенно зависят от параметров фильтра, так что на практике системы оптимизируются именно для них. Любой низкочастотный фильтр, применяемый для определения максимальных порывов, измеренных с помощью высокочастотных анемометров, сглаживающих данные на интервале в несколько секунд, может занижить среднее квадратическое отклонение на величину до 10 %. Это занижение можно скорректировать, если только известны характеристики фильтров в измерительной цепочке. На практике занижение часто оказывается меньшим, поскольку, когда среднее значение скорости ветра имеет положительный или отрицательный тренд, среднее квадратическое отклонение увеличивается. С другой стороны, можно независимо записывать исходный сигнал без какой-либо фильтрации с целью получения несмещенной оценки среднего квадратического отклонения. В следующем разделе даны рекомендации по созданию систем для измерения ветра с конкретными значениями характеристик фильтров.

Для точного измерения максимальных порывов желательно делать выборку из ряда отфильтрованных значений характеристик ветра каждые 0,25 с (частота 4 Гц). Можно использовать выборку более низкой частоты, однако следует принимать во внимание, что оценка максимального значения будет в большинстве случаев занижена, поскольку экстремальное значение порыва в отфильтрованном ряде может попасть в промежуток между отсчетами.

Что касается направления ветра, то следует избегать какой-либо дополнительной фильтрации помимо возникающей за счет инерции флюгера. Это означает, что для большинства моделей флюгера стандартное отклонение направления ветра может быть определено с точностью до 2 %.

Для точного расчета среднего квадратического отклонения направления ветра требуется минимальная разрешающая способность процесса оцифровки сигнала, которая часто осуществляется посредством цифрового кодирующего устройства, установленного на оси флюгера. В этом случае вполне достаточным является разрешение 7 бит, так как при этом среднее квадратическое отклонение в 5° может быть измерено с неопределенностью до 1 % (WMO, 1987).

5.8.3 Рекомендации по конструированию систем для измерения ветра¹

Системы для измерения параметров ветра могут иметь самые разные конструкции, так что в данной главе невозможно описать все возможные варианты. Здесь приведены два распространенных примера: один с преимущественно аналоговой обработкой сигнала, а другой с цифровой обработкой сигнала (WMO, 1987).

Первая система состоит из анемометра, для которого длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика составляет 5 м; импульсного генератора, вырабатывающего импульсы с частотой, пропорциональной скорости вращения анемометра (желательно несколько импульсов за один оборот); счетчика, который считает импульсы с интервалом в 0,25 с, и микропроцессора для вычисления средних значений скорости ветра и стандартного отклонения за десятиминутные периоды времени на основе данных, получаемых каждые 0,25 с. Предельные значения должны определяться на основе трехсекундных средних, например, посредством скользящего осреднения данных последних 12 замеров. Скользящее осреднение следует производить каждые 0,25 с (т. е. с перекрытием трехсекундных интервалов осреднения каждые 0,25 с). Направление ветра измеряется с помощью флюгера (для которого длина незатухающей волны составляет 5 м, степень затухания — 0,3), снабженного цифровым преобразователем в 7 бит, производящим выборку данные каждую секунду. Средние значения и стандартные отклонения вычисляются за десятиминутные периоды времени, в течение которых последовательные выборки проверяются на непрерывность. Если две следующих друг за другом выборки направления ветра отличаются более чем на 180° , то разница сокращается за счет прибавления к значениям второй выборки или вычитания из них 360° . Если длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика составляет 5 м для анемометра и флюгера (степень затухания 0,3; длина незатухающей волны 10 м), то средние квадратические отклонения скорости и направления ветра уменьшаются на 7 % и 2 % соответственно. Продолжительность порыва, соответствующая такой измерительной цепочке (в соответствии с определением в 5.1.1), составляет около трех секунд.

Вторая система состоит из анемометра, расстояние отклика которого составляет 5 м, генератора напряжения, вырабатывающего напряжение, пропорциональное скорости вращения анемометра при ежесекундном преобразовании сигнала из аналоговой формы в цифровую, и цифровой обработки измерений. Для измерения направления ветра используется флюгер с длиной незатухающей волны 5 м и степенью затухания 0,3 при ежесекундном преобразовании из аналоговой формы в цифровую и последующем вычислении средних значений направления и его стандартных отклонений для цифровых выборок. Для определения максимального порыва ветра генерируемое датчиком напряжение фильтруется с помощью фильтра системы первого порядка при постоянной времени, составляющей одну секунду, и преобразуется из аналоговой формы в цифровую каждые 0,25 с. Что касается фильтрации, эта система немного отличается от первой: стандартные отклонения скорости ветра и его направления сглаживаются на 12 % и 2 % соответственно, а минимальная продолжительность порыва составляет примерно три секунды. В этой системе вместо АЦП также может быть использован перьевой самописец, соединенный с аналоговым выходом устройства. В этом случае можно считывать только средние и предельные значения скорости и направления ветра, а продолжительность измеряемого порыва составляет около трех секунд, если только используемый перьевой самописец не сглаживает сигнал сильнее, чем цифровой фильтр первого порядка.

Описанная выше процедура обработки сигнала соответствует Рекомендации 3 (КПМН-Х) (ВМО, 1990) и гарантирует оптимальную точность. Однако эта процедура довольно сложна и требует применения скользящего осреднения и сравнительно высокой частоты выборки. Для многих применений совершенно приемлемо сократить дискретность измерения до одного измерения каждые три секунды при условии, что сигнал осредняется по непересекающимся трехсекундным интервалам. В результате минимальная регистрируемая продолжительность порыва составляет пять секунд, а среднее квадратическое отклонение уменьшается на 12 % (Beljaars, 1987; WMO, 1987).

¹ Рекомендовано 10-й сессией Комиссии по приборам и методам наблюдений (1989 г.).

5.9 РАЗМЕЩЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВЕТРОМ

5.9.1 Общее описание проблем

Скорость ветра значительно увеличивается с высотой, особенно над неровной поверхностью. В связи с этим была определена стандартная высота установки ветроизмерительных приборов на открытой местности, равная 10 м. Соответствующий сдвиг направления ветра с высотой над открытой местностью относительно мал, и при наблюдениях за ветром у поверхности земли им можно пренебречь. Оптимальным местом для наблюдения за ветром является такое, где наблюдаемый ветер является репрезентативным для участка местности размером, по меньшей мере, в несколько километров или где ветер может быть легко приведен к репрезентативному.

Если местность неровная, пересеченная или с неоднородной поверхностью, то и скорость, и направление ветра могут значительно искажаться. Во многих случаях возможна корректировка наблюдений за ветром, и уже появляются средства для расчета соответствующих поправок. С целью улучшения репрезентативности данных о ветре следует передавать пользователям необходимую информацию для проведения таких корректировок в дополнение к данным прямых измерений.

5.9.2 Размещение анемометров над сушей

Стандартная высота установки приборов для наблюдений за ветром над открытой ровной местностью составляет 10 м над поверхностью земли. Открытым считается участок местности, на котором расстояние между анемометром и любым препятствием равно не менее чем десятикратной высоте препятствия. Наблюдения за ветром, проводимые с подветренной стороны от группы деревьев, зданий или других препятствий, не представляют особой ценности и содержат мало информации о невозмущенном потоке воздуха. Поскольку волновые возмущения воздушного потока могут распространяться на расстояние, равное 12–15-кратной высоте препятствия, требование об удалении от препятствий на расстояние, равное их десятикратной высоте, является абсолютно минимальным. На практике часто бывает трудно найти хорошее или даже удовлетворительное место размещения станции для измерения ветра. Важность оптимального выбора расположения места измерения ветра трудно переоценить, тем не менее трудно дать универсальные рекомендации по этому вопросу. В некоторых случаях, однако, данные могут быть значительно скорректированы с поправкой на препятствия следующим образом:

- a) расстояние до препятствия более чем в 30 раз превышает его высоту: поправка не требуется;
- b) расстояние до препятствия более чем в 20 раз превышает его высоту: поправка может применяться;
- c) расстояние до препятствия более чем в 10 раз превышает его высоту: поправка может применяться в некоторых ситуациях с особой осторожностью.

Следует отметить, что, когда расстояние не превышает двадцатикратную высоту препятствия, погрешность измеренного значения до корректировки может составлять до 25 %, а когда расстояние приблизительно в 10 раз превышает высоту препятствия, измеренное значение может в некоторых случаях даже указывать на противоположное направление.

Более подробная информация о корректировке данных с учетом размещения прибора содержится в 5.9.4.

В таблице 5.3 кратко приводится классификация площадок по наблюдению за ветром на основе размещения и установки приборов. Данные в полном объеме о классификации размещения площадок для наземных станций приземных наблюдений, включая

Таблица 5.3. Классификация площадок по наблюдению за ветром на основе размещения и установки приборов

Класс	Расстояние от мачты до окружающих препятствий ^a (с высотой h)	Расстояние от датчиков до узких препятствий ^b (с высотой > 8 м, шириной w)	Показатель класса шероховатости ^c	Не учитывать единичные препятствия ниже x м
1	$\geq 30 h$	$\geq 15 w$	2–4 (коэффициент шероховатости $\leq 0,1$ м)	$x = 4$
2	$\geq 10 h$	$\geq 15 w$	2–5 (коэффициент шероховатости $\leq 0,25$ м)	$x = 4$
3	$\geq 5 h$	$\geq 10 w$		$x = 5$
4	$\geq 2,5 h$	Не имеется препятствий с угловой шириной $> 60^\circ$ и высотой > 10 м в радиусе 40 м		$x = 6$, при измерении ≥ 10 м
5	Не отвечает требованиям ни одного другого класса			

Примечания:

a Препятствием считается объект, имеющий угловую ширину $> 10^\circ$.

b Узкое препятствие — это, например, мачта, тонкое дерево или фонарный столб.

c Определение «шероховатости» приводится в приложении к данной главе.

дополнительные руководящие указания по выбору площадки и местоположению датчика ветра в целях повышения репрезентативности данных, можно найти в настоящем томе, глава I, приложение 1.D.

Необходимо учитывать два важнейших аспекта. Во-первых, анемометры следует, насколько это возможно, располагать подальше от местных препятствий. В тех случаях, когда измерения ветра проводятся не на вершине мачты или вышки, а сбоку от нее, приборы следует размещать на выносных штангах, длина которых составляет, как минимум, три ширины мачты или вышки (Gill et al., 1967). При размещении приборов на зданиях они должны быть приподняты над крышей не менее, чем на ширину здания. Во-вторых, следует тщательно описывать состояние окружающей местности (Wieringa, 1983). Должна быть, как минимум, составлена карта окрестностей станции в радиусе не менее 2 км, описывающая расположение и высоту препятствий и растительности, орографию местности и т. п. Изменения, происходящие в окрестностях станции, такие как, строительство зданий или увеличение высоты деревьев, должны быть исчерпывающе описаны в документации станции. Также должны быть подробно описаны размещенные на станции приборы.

В тех случаях, когда стандартная установка невозможна, анемометр должен устанавливаться на такой высоте, чтобы на его показания не влияли местные препятствия, а также чтобы эти показания по возможности давали представление о том, каким был бы ветер на высоте 10 м при отсутствии поблизости каких-либо препятствий. Если изменения рельефа местности по азимуту незначительные, то анемометр обычно помещают на уровень, превышающий 10 м на величину, зависящую от показателя шероховатости окружающей местности z_0 (см. приложение): около 13 м при $z_0 = 0,1$ м и около 19 м при $z_0 = 0,5$ м. Как показано в работе Wieringa (1980b), стратегия повышения уровня размещения анемометра не работает в случае, когда высота рельефа значительно изменяется с азимутом. Сейчас имеются простые методы количественной оценки влияния топографии местности (Walmsley et al., 1990), а для определения поправок на размещение прибора в условиях неоднородной окружающей местности используются климатологические ряды данных о порывистости ветра (Verkaik, 2000). Evans and Lee (1981) и Grimmond et al. (1998) рассматривают характер этой проблемы для условий города (см. также том III, глава 9 настоящего Руководства).

В условиях погоды с отрицательной температурой необходимо принимать особые меры для защиты ветровых приборов от гололеда и обледенения. В некоторых районах, возможно, следует предусмотреть искусственный обогрев открытых частей ветровых приборов с помощью, например ИК-излучателя с автоматическим поддержанием заданной температуры. Для определенных видов ветроизмерительных приборов уже разработаны специальные экраны для защиты от гололеда и обледенения (см. Curran et al., 1977).

5.9.3 Размещение анемометров на море

Все более насущной становится потребность в инструментальных измерениях ветра на море, особенно с помощью необслуживаемых автоматических систем (см. также том III, глава 4 настоящего Руководства). Решение этой задачи сопряжено с определенными трудностями, поскольку в морских условиях, из-за состояния моря и/или колебания уровня при приливе и отливе, не всегда можно выполнить стандартное требование, разработанное для суши, по установке приборов на высоте 10 м. Очевидное распространение на морские условия критерия установки прибора на суше приводит к мысли о том, что на заякоренных буйах, например, следует устанавливать анемометр на высоте 10 м над ватерлинией буя. Однако другие источники ошибок зачастую являются более значительными, чем те, которые связаны с различной высотой размещения ветровых приборов (см. обзор в WMO, 1981). В случае стационарных платформ и судов очень важно, чтобы датчики ветра устанавливались достаточно высоко над платформой и ее надстройками, для того чтобы избежать зачастую довольно сильного влияния самой платформы на локальную структуру поля ветра. В общем случае нельзя с полной уверенностью утверждать, что на датчик ветра не влияет конструкция платформы, даже если он расположен по крайней мере на 10 м выше самого высокого препятствия на платформе, за исключением тех случаев, когда платформа относительно мала. В обзоре ВМО (WMO, 1981) делается вывод о том, что для получения точных и полезных результатов измерений ветра следует отдавать приоритет правильному расположению приборов в морских условиях, а не размещению приборов на стандартной высоте 10 м (WMO, 1989). Несмотря на тщательный выбор размещения анемометра, на практике зачастую невозможно избежать связанных с этим ошибок. С целью обеспечения возможности проведения корректировки данных с учетом высоты измерения и возмущения воздушного потока необходимо иметь запись и подробную информацию о размещении анемометра, а также о платформе или типе судна (геометрическая форма, размер). В случае, когда скорость ветра измеряется на высоте существенно большей 10 м (т. е., когда соответствующий коэффициент приведения превышает 1,2), необходимо привести скорость ветра к уровню 10 м путем процедур, рекомендуемых в следующем пункте, и с использованием постоянной, соответствующей «открытому морю» в таблице, приведенной в приложении.

5.9.4 Корректировка данных с учетом размещения датчиков

При наблюдениях за приземным ветром вряд ли возможно избежать проблем, связанных с размещением приборов. Требование относительно размещения станции на открытой ровной местности выполнить сложно, поэтому для большинства станций на суше, где производятся измерения ветра, возникают трудности, связанные с возмущениями ветра, вызванными либо орографией, либо неоднородностью поверхности, либо с тем и другим одновременно (WMO, 1987; Wiering, 1996).

Ясно, что ошибки, допущенные при размещении датчиков ветра, создают проблемы для пользователей данных о ветре и зачастую делают эти данные бесполезными. Эта проблема является особенно серьезной при использовании данных в численных моделях прогноза погоды, где существует тенденция к раздельному анализу полей ветра и давления. Данные о приземном ветре, однако, могут быть использованы для инициализации модели только в том случае, если они являются репрезентативными для большой территории. Это означает, что ошибки, связанные с местными условиями и/или нестандартной высотой наблюдения, должны быть устранены.

Корректировка данных наблюдений за ветром для локальных условий размещения может производиться только при наличии данных измерений приемлемого качества и полученных для участков с не слишком шероховатой ($z_0 \leq 0,5$ м) и относительно ровной поверхностью. Не следует пытаться корректировать данные измерений, которые едва ли характеризуют средние значения по региону. Так, данные о ветре, полученные на станции в глубокой долине, где преобладают стоковые ветры, могут быть полезны для локальных прогнозов, но не являются репрезентативными для региона в целом.

Если U — это скорость ветра, измеренная на высоте z , то скорректированная скорость ветра U_c , которая наблюдалась бы на высоте 10 м над поверхностью с шероховатостью z_0 , определяется из:

$$U_c = U \cdot C_F \cdot C_T \cdot \frac{\ln(10/z_{0u})}{\ln(z/z_{0u})} \cdot \frac{\ln(60/z_{0u}) \ln(10/z_0)}{\ln(10/z_{0u}) \ln(60/z_0)} \quad (5.3)$$

где C_F — поправка на искажение потока; C_T — поправочный множитель, учитывающий влияние рельефа местности; z_{0u} — обобщенный параметр шероховатости поверхности с наветренной стороны от места наблюдений; z_0 — высота уровня шероховатости, принятая в данном виде расчетов (например, в пределах расчетной ячейки численной модели прогноза). В этом соотношении значения z , z_0 и z_{0u} выражены в метрах. Различные поправки означают следующее:

- a) искажение потока: поправка на искажение потока C_F учитывает влияние крупных местных объектов. Это особенно важно для анемометров, установленных на буровых установках, судах и морских платформах. Лучшим способом определения C_F как функции направления ветра является моделирование в аэродинамической трубе (Mollo-Christensen and Seesholtz, 1967). Также могут проводиться оценки, основанные на соотношениях для потенциального потока вокруг простых конструкций (Wyngaard, 1981; WMO, 1984b). В случае измерения ветра на вершине одиноко стоящей мачты возмущением воздушного потока можно пренебречь ($C_F = 1$);
- b) влияние топографии: эта поправка учитывает влияние высоты местности, окружающей станцию для измерения ветра. C_T представляет собой отношение осредненной по региону скорости ветра (осредненная скорость на высоте 10 м над горными хребтами и долинами в данном регионе) и скорости ветра, наблюдаемой на станции. Если станция расположена на вершине отдельного холма, значение C_T должно быть менее единицы, чтобы учесть влияние усиления ветра, вызванного холмом, и сделать результат репрезентативным не только для вершины холма, но и для всей местности в целом. Для ровной местности $C_T = 1$. Для отдельно стоящих холмов и горных хребтов оценки C_T могут проводиться на основе простых рекомендаций (Taylor and Lee, 1984). В более сложных топографических условиях требуются модельные расчеты на основе подробных карт рельефа окружающей станцию местности (Walmsley et al., 1990). Такие расчеты достаточно сложны, но должны производиться только один раз для одной станции для получения таблицы значений C_T как функции направления ветра;
- c) нестандартная высота наблюдения: этот эффект легко скорректировать посредством формулы U_c , допуская логарифмический профиль ветра в сочетании с параметром шероховатости z_{0u} подстилающей поверхности с наветренной стороны от места измерения. Для морских станций этот способ приведения к стандартной высоте может иметь большое значение. В этом случае поправки на устойчивость стратификации довольно незначительны, что оправдывает логарифмическую форму зависимости поправки от высоты;
- d) влияние шероховатости: влияние на ветер шероховатости поверхности с наветренной стороны, а также наземных препятствий может корректироваться путем экстраполяции скорости ветра по логарифмическому закону на высоту 60 м с учетом параметра шероховатости для конкретной станции z_{0u} и последующей обратной интерполяции на высоту 10 м с использованием параметра шероховатости z_0 , выбираемого в зависимости от вида применения данных. Параметр

шероховатости z_{0u} должен быть репрезентативным для двухкилометровой области с наветренной стороны от станции; величина z_{0u} обычно зависит от направления ветра. Методика определения z_{0u} описана в приложении.

Если возмущение потока и влияние топографии незначительны или были скорректированы, применяется (с) к поправке на расположение анемометра (d) с использованием формулы 5.3 при $z = 10$ м и $z_0 = 0,03$ м. В этом случае исправленная скорость ветра будет эквивалентна той, которая была бы измерена на гипотетической станции, расположенной в данном месте и отвечающей требованиям ВМО в части выполнения измерений на высоте 10 м. Скорость ветра, скорректированная таким образом, именуется потенциальной скоростью ветра (WMO, 2001). Здесь уместно сделать два замечания. Во-первых, высоту экстраполяции 60 м не следует рассматривать как твердо определенную величину. Высота между 40–80 м является вполне допустимой; выбор высоты 60 м является наиболее корректным применительно к двухкилометровой области, для которой величина z_{0u} является репрезентативной, и дает удовлетворительные результаты (Wieringa, 1986). Во-вторых, в диапазоне высот 10–60 м поправки профиля ветра на степень устойчивости вертикальной стратификации не могут не приниматься во внимание. Однако, при данной формулировке влияние степени устойчивости относительно мало, так как поправки на устойчивость при экстраполяции скорости ветра вверх и интерполяции ее вниз приблизительно компенсируют друг друга. Практический пример применения методов коррекции ветра в оперативной работе приведен в публикациях ВМО (WMO, 2000; WMO, 2001). Хотя большинство поправок на размещение приборов можно ввести непосредственно к измеренному ветру, включать в сводки надо как непосредственно измеренные (уровень I), так и скорректированные (уровень II) значения ветра.

5.10 КАЛИБРОВКА И ОБСЛУЖИВАНИЕ

Полностью надежная калибровка чашечных, крыльчатых и лопастных анемометров возможна лишь в аэродинамической трубе. Однако в настоящее время эксплуатационные качества таких приборов хорошо известны, и для большинства видов использования приборов, когда они находятся в хорошем состоянии, можно полагаться на калибровку изготовителя. Исследования в аэродинамической трубе полезны для специальных проектов или испытаний новых моделей приборов. Для получения дополнительной информации см. стандарты ИСО (ИСО 16622:2002 и ИСО 17713-1:2007).

В полевых условиях анемометры подвержены износу, поэтому рекомендуются их регулярные проверки. Изменение характеристик датчика, приводящее к ухудшению качества данных о ветре, может произойти в результате физического повреждения приборов, усиления трения в подшипнике или ухудшения процесса преобразования (например, снижения производительности генератора чашечного или крыльчатого анемометра в результате износа щетки).

Изучение записи в аналоговом режиме позволит выявить неисправности, такие как неверное положение нуля отсчета, ступенчатая форма кривых, вызванная трением, шум (который может проявляться при небольших скоростях ветра), низкий уровень чувствительности (при малых скоростях), а также нерегулярная или заниженная изменчивость регистрируемого ветра.

Следует проверять приборы на наличие повреждений путем проверки положения нуля анемометрической системы методом фиксирования чашек или лопастей, а ориентацию флюгера – путем фиксирования его в изначально заданном положении или положениях. Датчики, как правило, целесообразно ремонтировать только в условиях мастерской.

Следует регулярно проводить проверки системы путем контроля электрических и электронных компонентов электрических регистрирующих и телеметрических приборов. Поверять нулевую отметку и диапазон измерения следует у датчиков как скорости, так и направления ветра.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПАРАМЕТР ШЕРОХОВАТОСТИ

Для целей корректировки размещения ветроизмерительных приборов требуется информация о параметре шероховатости z_0 , репрезентативном для двухкилометровой области, расположенной с наветренной стороны от станции, как функции направления ветра. Эффективность введения поправки на шероховатость существенно зависит от точности определения этого параметра.

Предполагая равномерную выборку над морем, расчет коррекции параметра шероховатости относительно прост, поскольку может быть применено так называемое соотношение Чарнока. Оно выражает шероховатость морской поверхности в зависимости от скорости трения u^* и ускорения под действием силы тяжести g с помощью уравнения $z_{0u} = \alpha u^{*2}/g$, где α — эмпирическая константа, приблизительно равная 0,014. Связь скорости трения с вертикальным профилем ветра при нейтральной стратификации можно выразить с помощью уравнения $U(z) = (u^*/\kappa) \ln(z/z_{0u})$, где κ — постоянная Кармана (0,4), а z — высота наблюдения. Эти два уравнения приходится решать методом итерации, применение которого следует начать со значения z_{0u} , равного 0,000 1, и вычислить u^* для логарифмического профиля ветра, затем еще раз рассчитать z_{0u} и повторять эту процедуру расчета несколько раз.

Параметр шероховатости подстилающей поверхности зависит от типа поверхности и вида ее использования и поэтому, как правило, трудно поддается оценке. Субъективный способ определения z_{0u} основан на визуальном обследовании территории вокруг станции и использовании приведенной ниже таблицы, справедливость которой была недавно подтверждена (Davenport et al., 2000). Наиболее приемлемым способом является задание секторов в 30° по направлению ветра до расстояния 2 км. В условиях высокой степени неоднородности подстилающей поверхности интегральный параметр ее шероховатости должен определяться путем осреднения значений $\ln(z_{0u})$, а не собственно z_{0u} .

Классификация местности по Davenport (1960), адаптированная Wieringa (1980b) применительно к аэродинамическому параметру шероховатости z_0

Класс	Краткое описание местности	z_0 (м)
1	Открытое море, длина разгона не менее 5 км	0,0002
2	Плоская заиленная равнина, снежный покров; отсутствие растительности, препятствий	0,005
3	Открытая плоская поверхность; трава, редкие отдельно стоящие препятствия	0,03
4	Невысокие сельскохозяйственные культуры; редкие большие препятствия, $x/H > 20$	0,10
5	Высокие сельскохозяйственные культуры; умеренное количество препятствий, $15 < x/H < 20$	0,25
6	Парковые насаждения, кусты; многочисленные препятствия, $x/H \approx 10$	0,5
7	Зона с регулярно расположенными высокими препятствиями (городская окраина, лес)	1,0
8	Городской центр с высокими и низкими зданиями	≥ 2

Примечание: здесь x — типичное расстояние от препятствия с наветренной стороны от него, а H — высота соответствующих крупных препятствий. Более детальное и современное описание классов местности содержится в Davenport et al. (2000) (см. также том III, глава 9, таблица 9.2 настоящего Руководства).

Лучшим способом определения z_{0u} является его оценка на основе рядов данных о средних квадратических отклонениях длиной в 1 год. Средние квадратические отклонения скорости ветра и его направления связаны с параметром шероховатости поверхности на участках протяженностью в несколько километров и могут быть использованы для объективной оценки z_{0u} . Как среднее квадратическое отклонение скорости ветра s_u , так и среднее квадратическое отклонение направления ветра s_d (в радианах) могут использоваться при расчетах z_{0u} с помощью следующих формул:

$$s_u/U = c_u \kappa [\ln(z/z_{0u})]^{-1} \quad 5.A.1$$

$$s_d/U = c_v \kappa [\ln(z/z_{0u})]^{-1} \quad 5.A.2$$

где $c_u = 2,2$, $c_v = 1,9$ и $\kappa = 0,4$ в случае, когда значения s_u и s_d основаны на нефiltroванных измерениях. Для измерительных систем, описанных в 5.8.3, фильтрация сигнала приводит к уменьшению среднего квадратического отклонения скорости ветра приблизительно на 12 %, а направления ветра — на 2 %, что означает уменьшение c_u и c_v до 1,94 и 1,86 соответственно. Для применения вышеуказанных уравнений необходимо выбрать случаи сильного ветра ($U > 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) и осреднить s_u/U и/или s_d для всех имеющихся данных и секторов направления ветра (шириной 30°) и сезонов (шероховатость подстилающей поверхности зависит, например, от степени густоты листового покрова деревьев). После этого можно определить значение z_{0u} с помощью вышеуказанных уравнений, а сравнение результатов расчетов с использованием s_u и s_d даст некоторое представление о полученной точности.

В случаях, когда отсутствуют данные о среднем квадратическом отклонении, а максимальный порыв ветра определяется за период осреднения ветра (10 мин или 1 час), для расчетов z_{0u} можно также использовать отношение максимальных порывов к средним значениям за тот же период (коэффициент порывистости) (Verkaik, 2000). Для применения этого подхода необходимы сведения о динамике системы, а именно о длине пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика и времени реакции измерительной цепочки.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Всемирная метеорологическая организация, 1990: *Сокращенный окончательный отчет десятой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 727). Женева.
- , 2011 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1. Женева.
- Ackermann, G.R., 1983: Means and standard deviations of horizontal wind components. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22:959–961.
- Albers, A., H. Klug and D. Westermann, 2000: Outdoor comparison of cup anemometers. *DEWI Magazin*, No. 17.
- Beljaars, A.C.M., 1987: The influence of sampling and filtering on measured wind gusts. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 4:613–626.
- Busch, N.E. and L. Kristensen, 1976: Cup anemometer overspeeding. *Journal of Applied Meteorology*, 15:1328–1332.
- Coppin, P.A., 1982: An examination of cup anemometer overspeeding. *Meteorologische Rundschau*, 35:1–11.
- Curran, J.C., G.E. Peckham, D. Smith, A.S. Thom, J.S.G. McCulloch and I.C. Strangeways, 1977: Cairngorm summit automatic weather station. *Weather*, 32:60–63.
- Davenport, A.G., 1960: Rationale for determining design wind velocities. *Journal of the Structural Division*, American Society of Civil Engineers, 86:39–68.
- Davenport, A.G., C.S.B. Grimmond, T.R. Oke and J. Wieringa, 2000: Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Preprints of the Twelfth American Meteorological Society Conference on Applied Climatology* (Asheville, NC, United States), pp. 96–99.
- Evans, R.A. and B.E. Lee, 1981: The problems of anemometer exposure in urban areas: a wind-tunnel study. *Meteorological Magazine*, 110:188–189.
- Frenkiel, F.N., 1951: Frequency distributions of velocities in turbulent flow. *Journal of Meteorology*, 8:316–320.
- Gill, G.C., L.E. Olsson, J. Sela and M. Suda, 1967: Accuracy of wind measurements on towers or stacks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 48:665–674.
- Gold, E., 1936: Wind in Britain: The Dines anemometer and some notable records during the last 40 years. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 62:167–206.
- Grimmond, C.S.B., T.S. King, M. Roth and T.R. Oke, 1998: Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 89:1–24.
- International Organization for Standardization, 2002: *Meteorology – Sonic Anemometers/Thermometers – Acceptance Test Methods for Mean Wind Measurements*, ISO 16622:2002. Geneva.
- , 2007: *Meteorology – Wind Measurements – Part I: Wind Tunnel Test Methods for Rotating Anemometer Performance*, ISO 17713-1:2007. Geneva.
- Kaimal, J.C., 1980: Sonic anemometers. In: *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds.). Plenum Press, New York, pp. 81–96.
- Lenschow, D.H. (ed.), 1986: *Probing the Atmospheric Boundary Layer*. American Meteorological Society, Boston.
- MacCready, P.B., 1966: Mean wind speed measurements in turbulence. *Journal of Applied Meteorology*, 5:219–225.
- MacCready, P.B. and H.R. Jex, 1964: Response characteristics and meteorological utilization of propeller and vane wind sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 3:182–193.
- Makinwa, K.A.A., J.H. Huijsing and A. Hagedoorn, 2001: Industrial design of a solid-state wind sensor. *Proceedings of the First ISA/IEEE Conference* (Houston, November 2001), pp. 68–71.
- Mazzarella, D.A., 1972: An inventory of specifications for wind-measuring instruments. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53:860–871.
- Mollo-Christensen, E. and J.R. Seesholtz, 1967: Wind tunnel measurements of the wind disturbance field of a model of the Buzzards Bay Entrance Light Tower. *Journal of Geophysical Research*, 72:3549–3556.
- Patterson, J., 1926: The cup anemometer. *Transactions of the Royal Society of Canada*, 20(III):1–54.
- Smith, S.D., 1980: Dynamic anemometers. In: *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds.). Plenum Press, New York, pp. 65–80.
- Taylor, P.A. and R.J. Lee, 1984: Simple guidelines for estimating wind speed variations due to small scale topographic features. *Climatological Bulletin*, Canadian Meteorological and Oceanographic Society, 18:3–22.
- van Oudheusden, B.W. and J.H. Huijsing, 1991: Microelectronic thermal anemometer for the measurement of surface wind. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 8:374–384.
- Verkaik, J.W., 2000: Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 39:1613–1626.

- Walmsley, J.L., I.B. Troen, D.P. Lalas and P.J. Mason, 1990: Surface-layer flow in complex terrain: Comparison of models and full-scale observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 52:259–281.
- Wieringa, J., 1967: Evaluation and design of wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 6:1114–1122.
- , 1980a: A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding. *Boundary-Layer Meteorology*, 18:411–430.
- , 1980b: Representativeness of wind observations at airports. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61:962–971.
- , 1983: Description requirements for assessment of non-ideal wind stations, for example Aachen. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 11:121–131.
- , 1986: Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112:867–889.
- , 1996: Does representative wind information exist? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 65:1–12.
- Wieringa, J. and F.X.C.M. van Lindert, 1971: Application limits of double-pin and coupled wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 10:137–145.
- World Meteorological Organization, 1981: *Review of Reference Height for and Averaging Time of Surface Wind Measurements at Sea* (F.W. Dobson). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 3. Geneva.
- , 1984a: *Compendium of Lecture Notes for Training Class IV Meteorological Personnel* (B.J. Retallack). (WMO-No. 266), Volume II. Geneva.
- , 1984b: Distortion of the wind field by the Cabauw Meteorological Tower (H.R.A. Wessels). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO). Instruments and Observing Methods Report No. 15. Geneva.
- , 1987: *The Measurement of Gustiness at Routine Wind Stations: A Review* (A.C.M. Beljaars). Instruments and Observing Methods Report No. 31. Geneva.
- , 1989: *Wind Measurements Reduction to a Standard Level* (R.J. Shearman and A.A. Zelenko). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 22 (WMO/TD-No. 311). Geneva.
- , 1991: *Guidance on the Establishment of Algorithms for Use in Synoptic Automatic Weather Stations: Processing of Surface Wind Data* (D. Painting). Report of the CIMO Working Group on Surface Measurements, Instruments and Observing Methods Report No. 47 (WMO/TD-No. 452). Geneva.
- , 2000: Wind measurements: Potential wind speed derived from wind speed fluctuations measurements, and the representativity of wind stations (J.P. van der Meulen). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000). Instruments and Observing Methods Report No. 74 (WMO/TD-No. 1028). Geneva.
- , 2001: *Lecture Notes for Training Agricultural Meteorological Personnel* (J. Wieringa and J. Lomas) (WMO-No. 551). Geneva.
- Wyngaard, J.C., 1981: The effects of probe-induced flow distortion on atmospheric turbulence measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 20:784–794.
-