

А.Б. Рыхлов

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА С ВЫСОТОЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ НА ЮВ ЕТР ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

A.B. Rikhlov

LAWS OF CHANGE OF AVERAGE SPEED OF THE WIND WITH HEIGHT IN THE GROUND LAYER OF ATMOSPHERE ON SOUTH-EAST EUROPEAN PART OF RUSSIA FOR THE DECISION OF PROBLEMS WIND POWER

Рассматриваются климатические закономерности изменения скоростей ветра с высотой. Приведены результаты анализа характеристик ветра в приземном слое атмосферы, которые могут быть использованы при разработке ветроэнергетического кадастра. Они получены в результате систематизации и обобщения аэрологических данных и регулярных наблюдений за скоростью ветра на различных высотах нижнего слоя атмосферы с использованием высотных мачт.

Ключевые слова: скорость ветра, средняя, высота, закон, изменение с высотой, степенная функция, логарифмическая функция, параметр шероховатости, аппроксимация, точность, зависимость.

Climatic laws of change of speeds of a wind with height are considered. Results of the analysis of characteristics of a wind in a ground layer of atmosphere which can be used by working out of wing power cadastre are resulted. They are received as a result of ordering and generalization of the aerological given and regular supervision over speed of a wind at various heights of the bottom layer of atmosphere with use of high-rise masts.

Keywords: speed of a wind, average, height, the law, change with height, sedate function, logarithmic function, roughness parameter, approximation, accuracy, dependence.

В исследованиях, посвященных изучению изменения скорости ветра с высотой ярко прослеживается проблемный (предметный) подход и связь с решаемой задачей. Это обуславливает выбор и исходных данных (срочные, суточные и месячные средние, максимальные скорости), и методов их климатологической обработки. В частности, к ним относятся проблема учета влияния мезомасштабных явлений на развитие процессов тепло- и влагообмена, турбулентного трения, происходящих в пограничном слое атмосферы. Существует еще целый ряд чисто научных задач, для которых детальное изучение приземного слоя атмосферы представляет особый интерес. Все перечисленные задачи решаются специальными, только им присущими, методами. Решение именно этих задач предусматривает учет фактора времени и базируется на использовании одно-временных (срочных) синхронных наблюдений на различных уровнях при дополнительно налагаемых условиях.

Если же в качестве репера выбирать среднее значение скорости ветра, как выражения многолетнего режима, климатологические задачи решаются совер-

шенно иначе, для них фактор времени не имеет существенного значения. Прикладное назначение решений здесь также весьма разнообразно. Однако вопросы связанные с математическим описанием режима средних скоростей ветра на различных высотах приземного слоя еще не нашли окончательного ответа и научные поиски в этом направлении продолжаются. Особенность задачи состоит в том, что в отличие от синхронных профилей, для которых имеется целый ряд вариантов решения, уровень теоретической проработки вопросов интерполяции (экстраполяции) климатических характеристик ветра по высоте в приземном слое атмосферы значительно ниже. Объясняется это, главным образом, сложностью и многообразием физических процессов, формирующих вертикальные распределения климатических параметров, которые назвать профилями, из-за их несинхронности, можно лишь условно.

В результате изучения вертикальных профилей скоростей ветра были получены интерполяционные формулы в виде [12]:

$$\frac{\bar{v}_z}{\bar{v}_h} = \left(\frac{z}{h} \right)^m \quad \text{и} \quad (1)$$

$$\bar{v}_z = \bar{v}_h \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln h - \ln z_0}, \quad (2)$$

где \bar{v}_z и \bar{v}_h – средние скорости ветра на произвольной высоте z и флюгера h м; z_0 – параметр шероховатости, m – безразмерный параметр. Эти параметры в общем случае зависят от турбулентности, стратификации атмосферы и местных физико-географических условий. В стандартах большинства стран Западной Европы параметр m принят равным $1/7$ [12], для равнинной части территории бывшего СССР – $0,2$ [160, 162]. Однако в последние десятилетия общего мнения в отношении параметров m и z_0 не сложилось.

Так, в работе посвященной разработке методов оценки перспектив развития ветроэнергетики в США [9], отмечается что степенной закон может применяться для осреднений энергии ветра и значение $m = 1/7$ в этом случае достаточно обосновано. В ней на основании данных, полученных на башнях в четырех различных местностях США, принимается среднее значение $m = 0,23 \pm 0,03$. Исследования, результаты которых приведены в [3] и [4], показали, что изменение скорости ветра в зависимости от высоты будет функцией v_z , v_h и высоты, на которой проведены измерения. По существу, эти зависимости исходят из того, что значение m уменьшается с увеличением средней скорости ветра, т.е. нарастание скорости ветра с высотой при малых значениях происходит интенсивнее.

Ни одно из ранее упоминавшихся значений не дает хорошей аппроксимации данных для всех местоположений: например, данные телебашни в Филадельфии дают $m = 0,34$ [9]. Изменение максимальных значений скорости ветра у поверхности земли для различных метеостанций, даже расположенных в одно-

родных районах, таких, как западные штаты США и Великие равнины, не объясняет большую изменчивость средних значений. Следовательно, трудно обосновать использование одного значения m по сравнению с другим для пересчета скорости ветра даже по национальной шкале. Кроме того, по мнению авторов [9] значение m для места, соответствующего вероятному местоположению ветродвигателя, может значительно отличаться от оцениваемого по имеющимся данным измерений на башнях. Однако некоторые допущения относительно вертикального градиента скорости ветра все же должны быть сделаны, в частности для определения энергии ветра на высоте установки оси ветроколеса.

Очевидно, что важным вопросом надежности восстановления средних скоростей ветра на высотах является точность их аппроксимации той или иной формулой. Для приземного и пограничного слоев атмосферы эти вопросы рассматривались во многих отечественных [1, 2, 14, 23 и др.] и зарубежных работах ученых [25, 26, 28 и др.] В них показано, что профили ветра в слое атмосферы до высоты несколько сотен метров точнее описываются степенной формулой, чем логарифмической. В работе М.В. Завариной и В.Г. Цверавы [11] приведено несколько профилей ветра, построенных по материалам аэрологических измерений в нижнем 500-метровом слое атмосферы. Там же было показано, что при больших скоростях ветра эти профили не могут достаточно хорошо описываться логарифмической формулой.

Из работ раннего периода отметим, прежде всего, цикл исследований В.М. Склярова [24]. В его работах приведены подробные характеристики ветра для стандартных аэрологических уровней, включая нижний километровый слой. К числу основных результатов работы [24] следует отнести выявление пяти типовых профилей ветра, соответствующих различным типам местности. Как в лесной, так и в лесостепной зонах m на возвышенностях оказался в 1,3–1,4 раза меньше, чем на ровной местности. Наибольших значений этот параметр достигает в условиях лесных полян, где он в полтора раза больше, чем на равнине, и примерно в три раза – по сравнению с акваториями.

В монографической работе под редакцией Сапожниковой С.А. [22] едва ли не впервые дан опыт климатологического обобщения данных наблюдений за ветром в нижней части пограничного слоя атмосферы. В работе [13] приведены характеристики режима ветра в слое лишь до 100 м, однако они могут быть использованы и для восстановления характеристик в вышележащих слоях, по крайней мере до уровня 200 м. Правомерность такого подхода подтверждена более поздними разработками М.М. Борисенко [3]. Им было установлено, что при аппроксимации ветровых профилей степенной функцией высоты показатель степени m почти одинаков для 100- и 200-метрового слоев (различия не превышают 10% самой величины m). Это означает, по его мнению, что вертикальный профиль скорости ветра в 200-метровом слое атмосферы можно восстановить, зная распределение скорости в нижних 100 метрах.

В работах М.М. Борисенко [3], М.М. Борисенко и М.В. Завариной [4] про-

ведено сравнение точности аппроксимации профилей скорости ветра логарифмической формулой (2) и упрощенной степенной формулой (1). Кроме наблюдений на высотной мачте в Ленинграде, ими были обработаны результаты достаточно надежных измерений, проводившихся до высоты 300 м на высотной мачте в Обнинске [19], на телевизионной мачте в Киеве и нескольких зарубежных высотных мачтах. К сожалению, профили ветра осреднялись по градациям скорости ветра, как у поверхности земли, так и на высотах, а также по типам температурной стратификации атмосферы, поэтому полученные выводы нельзя применять к средним месячным и годовым профилям. При осреднении по типам профилей скоростей ветра для оценки точности аппроксимации указанными формулами использовались специальные логарифмические или полулогарифмические клетчатки вероятностей, на которых линии спрямлялись по методу наименьших квадратов. По степени спрямления профилей, характеризующей величиной среднего квадратического отклонения точек профиля от прямой, оценивалась точность их аппроксимации формулами (1) и (2).

Во многих работах, посвященных климатическим аспектам ветроэнергетики, важное место уделено вопросам методики перехода от удельной мощности ветрового потока на стандартной высоте флюгера (анемометра), т.е. 10 м, к ее значению на высоте оси ветроколеса. Поскольку ось ветроколеса подавляющего большинства ВЭУ в 1980-х годах располагалась на высотах 30–50 м, то наиболее важные сведения о климатических закономерностях распределения ветра того времени отнесены именно к этому слою. Довольно подробный анализ состояния этого вопроса в США содержится в монографии Д. де Рензо [9]. Работа четырех авторов, проводивших изучение климатических характеристик ветроэнергоресурсов в ФРГ, содержит полученные ими значения параметра m в формуле Арчибальда–Хельмана (степенной) для каждого месяца по континентальному району территории страны. Они предложили эмпирические формулы, позволяющие оценить внутригодовую изменчивость параметра m [6].

Маломощные ВЭУ обычно рассчитаны на небольшой срок эксплуатации. Крупные ВЭУ, особенно промышленного производства электроэнергии, эксплуатируются гораздо более длительно, у них только гарантийный срок работы составляет более 20 лет. Такая продолжительность эксплуатации ВЭУ обуславливает необходимость использования климатической информации, которая составляет основу оценки вырабатываемого количества энергии. В этой связи следует заметить, что под климатом общепризнано понимается многолетний режим погоды, характерный для данной местности, в том числе и скоростной режим ветра. Факторы, формирующие этот режим, определяют и определенный режим термодинамических состояний, и режим скоростей ветра. В соответствии с этим, параметр m в степенной формуле изменения средней скорости ветра с высотой, должен содержать все отмеченные климатические особенности места обустройства ВЭУ. Инверсии температуры, начальные скорости ветра на высоте флюгера изначально входят в понятие климатических характеристик, они и

определяют средние профили ветра. Разумеется, в отдельные часы суток они могут существенно отличаться от средних, но их необходимо учитывать лишь при изучении режимов эксплуатации ВЭУ. На оценку выработки энергии на высоте установки оси ветроколеса в течение десятилетий это не может оказать заметного влияния.

Наиболее надежные данные о профилях ветра могут быть получены при помощи измерений на высотных мачтах. Преимущество этих данных перед аэрологическими заключается в том, что они могут быть получены по абсолютно синхронным наблюдениям, однотипными приборами на всех высотах. Точность измерений на высотных мачтах выше, чем точность аэрологических методов. Недостатком данных измерений на высотных мачтах является то, что период этих наблюдений пока невелик, к тому же производятся они в немногих пунктах. Поэтому для изучения закономерностей изменения скорости ветра с высотой в разнообразных физико-географических условиях данные этих наблюдений иногда следует использовать как ориентировочные. Значительно больший материал дают аэрологические наблюдения, на основе анализа и обобщения которых можно получить профили скорости ветра в большем числе районов обширной территории. Однако некоторые вопросы, в частности такой важный вопрос, как точность аппроксимации профилей ветра с помощью той или иной функции высоты, целесообразнее все же решать на основе результатов измерений на мачтах.

Как известно, способы определения параметра шероховатости можно разделить на три группы: по данным о вертикальном профиле скорости ветра, по визуальным или картографическим данным о местности и по данным о турбулентности. При этом всегда следует учитывать масштаб явления или процесса, для которого предполагается использовать полученное значение z_0 .

Исторически первые способы определения z_0 по профилям скорости ветра хорошо разработаны, они широко используются в разных вариантах в зависимости от числа и высоты измерительных уровней (см., например, [8, 10, 18]). При расположении их в пределах нижних 10–30 м приземного слоя значения z_0 отражают свойства подстилающей поверхности, которая должна быть однородной до расстояний порядка 1–2 км. Область подстилающей поверхности, влияющая на профили скорости ветра, а значит, на эффективную шероховатость при использовании более высоких уровней измерений увеличивается, достигая при $z = 100$ м расстояний до 10 км [7]. Профиль скорости ветра в пределах всего пограничного слоя и соответствующая ему эффективная шероховатость ("мезошероховатость") характеризуют подстилающую поверхность уже в пределах сотни километров. Оценки параметра шероховатости по профилям скорости ветра, измеренным на мачтах, приведены в [7, 27]. Слабым местом способов определения z_0 по профилям скорости ветра являются, с одной стороны, высокие требования к точности измерений, а с другой – зависимость формирования этих профилей от температурной стратификации, которую с той или

иной степенью точности все же можно учесть с помощью универсальных функций приземного слоя.

Тем не менее, в научных работах вопрос о выборе вида закона изменения средней скорости ветра с высотой однозначно не решен. Для окончательного ответа на этот вопрос в настоящей работе поставлена задача – исследовать предпочтительность того или иного закона для оценки именно средней скорости ветра на произвольной высоте. Нами эта задача решалась с привлечением материалов срочных наблюдений на высотных метеорологических мачтах [15]. В результате их обработки рассчитаны средние месячные и годовые скорости ветра на различных высотах приземного слоя атмосферы в ряде пунктов на ЕТР. Они послужили основой для применения графического метода представления связи изменения скорости ветра с высотой в логарифмических и полулогарифмических координатах.

Действительно степенную формулу (1) можно легко преобразовать к виду

$$\ln \frac{\bar{v}_z}{v_h} = m \cdot \ln \left(\frac{z}{h} \right),$$

а логарифмическую (2) – к виду

$$\frac{\bar{v}_z}{v_h} = \frac{1}{\ln h - \ln z_0} \cdot \ln(z) - \frac{\ln z_0}{\ln h - \ln z_0}.$$

Отсюда следует, что в логарифмических или полулогарифмических координатах линия изменения скорости ветра с высотой должна аппроксимироваться прямой. В качестве величины достоверности аппроксимации можно использовать коэффициент детерминированности R^2 , являющийся функцией квадратов отклонения эмпирических и модельных значений

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}},$$

где y_i и y'_i – эмпирическое и теоретическое значение переменных. Значение R^2 иногда называют квадратом смешанной корреляции, оно позволяет судить о близости значений на прямой и фактических данных. Величина R^2 может изменяться от 0 до 1, если она равна 1, то имеет место полная корреляция эмпирических данных с теоретической моделью или функциональная зависимость. В случае линейной зависимости эта величина представляет собой квадрат коэффициента корреляции.

Для проверки пригодности степенной формулы в настоящем исследовании в координатах $y = \ln \frac{\bar{v}_z}{v_h}$ и $x = \ln \left(\frac{z}{h} \right)$ по фактическим данным были произведены графические построения связи средних скоростей ветра и высот, на которых

они измерялись, для всех месяцев года для Останкино, Обнинска и Санкт-Петербурга. Это позволяет по характеру линии наглядно убедиться в приемлемости данного вида связи. На рис. 1 в качестве примера представлена связь изменения средних месячных и годовых скоростей ветра с высотой для центральных месяцев сезонов и года в целом для Останкино за период 1971-1985 гг., где наблюдения производились на высотах 9, 85, 128, 201, 253, 305, 385 и 503 м. Анализ показывает, что точки на графиках располагаются практически на прямой линии. Её параметры нами рассчитывались методом наименьших квадратов. Кроме того оценены коэффициенты детерминированности R^2 , оказалось, что они близки к единице, что свидетельствует о почти функциональной зависимости между рассматриваемыми величинами. Из этого следует, что степенная формула позволяет надежно восстанавливать вертикальный профиль средних месячных и годовых скоростей ветра на высотах приземного слоя атмосферы до высот около 500 м. Угловой коэффициент в уравнении прямой построенной с использованием метода наименьших квадратов выражает параметр m . В Останкино он колеблется в зависимости от сезона от 0,34 до 0,41, а в целом за год составляет 0,36.

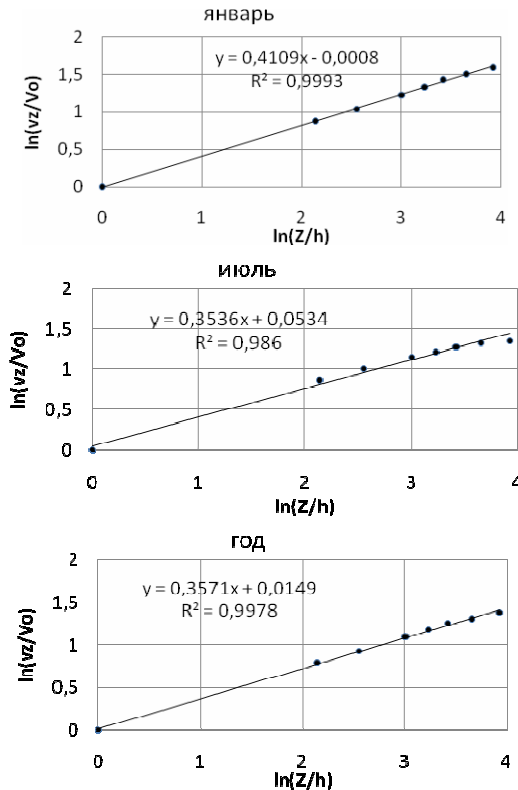


Рис. 1. Изменение средней скорости ветра с высотой в логарифмических координатах. Останкино, 1971–1985 гг. (Параметр m)

Аналогично в координатах $y = \frac{\bar{v}_z}{v_h}$ и $x = \ln(z)$ нами построены графики зависимости средней скорости ветра от высоты ее измерения для параметра z_0 . Их анализ показывает, что и логарифмическая зависимость дает расположение точек достаточно тесное относительно прямой, параметры которой рассчитаны методом наименьших квадратов (рис. 2).

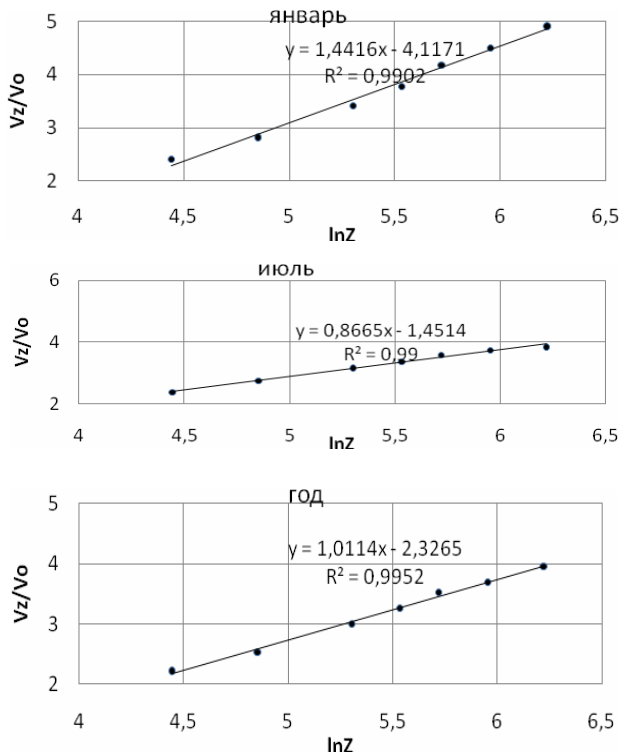


Рис. 2. Изменение средней скорости ветра с высотой в полулогарифмических координатах. Останкино, 1970–1977 гг. (Параметр z_0)

Полученные в настоящем исследовании оценки коэффициентов детерминированности R^2 превышают 0,99 и свидетельствуют о почти функциональной зависимости рассматриваемых переменных как в отдельные месяцы, так и в целом за год. Следовательно, и логарифмическая формула надежно соответствует реальному изменению средней месячной и годовой скорости ветра с высотой.

Таким образом, анализ характера связи изменения средних скоростей ветра с высотой позволяет сделать следующие выводы:

1. Для восстановления среднего многолетнего профиля скорости ветра с высотой можно с успехом использовать как степенную, так и логарифмическую формулы.

2. Применение графического метода показало, что точки на графиках в логарифмических (степенная формула) и полулогарифмических (логарифмическая формула) координатах достаточно тесно группируются относительно прямой, поэтому для построения ее уравнения (определения параметров m и z_0) может быть достаточно двух уровней (точек).

К основным недостаткам степенного закона изменения скорости ветра с высотой следует отнести малопонятный физический смысл параметра m , зависящего от целого ряда факторов. В отличие от этого, параметр z_0 в логарифмической формуле имеет размерность и четкий физический смысл величины высотного уровня, на котором средняя скорость под влиянием шероховатости поверхности становится равной нулю. Поэтому использование параметра шероховатости z_0 может оказаться предпочтительнее, поскольку позволяет связать изменение средней скорости ветра с высотой со строением подстилающей поверхности.

Полученные выводы являются научной основой для оценки параметров законов изменения средней скорости ветра с высотой с учетом географического местоположения. Для решения этой задачи нами произведен массовый расчет параметров z_0 и m в отдельных пунктах рассматриваемой территории по вертикальному профилю ветра. В качестве исходных данных были использованы материалы «Нового аэроклиматического справочника пограничного слоя атмосферы над СССР» [17], где приведены статистические параметры ветра на различных уровнях за период 1970–1980 гг. Список отобранных станций для рассматриваемой территории приведен в таблицах. Параметры z_0 и m рассчитанные по средним скоростям ветра на двух уровнях 10 и 100 м приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров z_0 и m функции высоты для метеостанций ЮВ ЕТР

Станция	П-р	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Астрахань	z_0	0,12	0,11	0,07	0,14	0,06	0,08	0,10	0,10	0,34	0,37	0,36	0,31	0,16
	m	0,18	0,18	0,16	0,19	0,16	0,17	0,18	0,18	0,23	0,23	0,23	0,22	0,19
Волгоград	z_0	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
	m	0,10	0,10	0,10	0,12	0,12	0,14	0,13	0,12	0,14	0,12	0,10	0,11	0,11
Гурьев	z_0	0,08	0,07	0,01	0,05	0,19	0,26	0,29	0,44	0,33	0,58	0,32	0,30	0,18
	m	0,17	0,16	0,12	0,15	0,20	0,21	0,22	0,24	0,22	0,26	0,22	0,22	0,20
Казань	z_0	0,18	0,12	0,12	0,22	0,08	0,08	0,33	0,52	0,28	0,08	0,07	0,09	0,15
	m	0,20	0,18	0,18	0,20	0,17	0,17	0,22	0,25	0,22	0,17	0,16	0,17	0,19
Куйбышев	z_0	0,89	1,13	0,89	1,06	0,71	0,85	0,92	1,31	1,44	1,44	1,26	0,95	1,06
	m	0,29	0,31	0,29	0,31	0,27	0,29	0,29	0,33	0,34	0,34	0,32	0,30	0,31
Оренбург	z_0	0,41	0,56	0,51	0,24	0,39	0,44	0,48	0,38	0,54	0,55	1,12	0,78	0,52
	m	0,24	0,26	0,25	0,21	0,23	0,24	0,24	0,23	0,25	0,25	0,31	0,28	0,25
Пенза	z_0	0,08	0,14	0,05	0,08	0,12	0,44	0,52	0,46	0,34	0,23	0,19	0,06	0,17
	m	0,17	0,19	0,16	0,17	0,18	0,24	0,25	0,24	0,23	0,21	0,20	0,16	0,20
Саратов	z_0	0,04	0,06	0,01	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,10	0,09	0,04	0,04	0,04
	m	0,15	0,16	0,12	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,18	0,17	0,15	0,15	0,15
Тамбов	z_0	1,16	0,95	0,85	0,94	0,88	1,00	1,31	1,53	1,47	1,23	1,11	1,22	1,12
	m	0,32	0,30	0,29	0,30	0,29	0,30	0,33	0,35	0,34	0,32	0,31	0,32	0,31
Уфа	z_0	0,74	0,74	0,49	1,00	1,00	1,00	1,52	1,98	1,55	0,82	0,87	0,75	0,99
	m	0,27	0,28	0,25	0,30	0,30	0,30	0,35	0,38	0,35	0,28	0,29	0,28	0,30

В качестве следующего этапа исследования нами решалась задача поиска связи между параметрами z_o и m . Это вызвано прежде всего тем, что параметр шероховатости имеет гораздо больший диапазон изменчивости – от 0 до 200 см и эта изменчивость не всегда однозначно выражается через характеристики орографии, ближайшего окружения и высоты флюгера пункта наблюдения. Необходимо также учитывать, что для оценки параметра необходимо располагать особо точными измерениями. Параметр m изменяется гораздо меньше – от 0,10 до 0,40, поэтому он более удобен для проведения обобщения и районирования территории.

Результаты расчетов позволили нам установить, что между этими параметрами имеется функциональная связь, но не линейного, а, как выявлено в результате испытания различных элементарных функций, параболического характера (рис. 3).

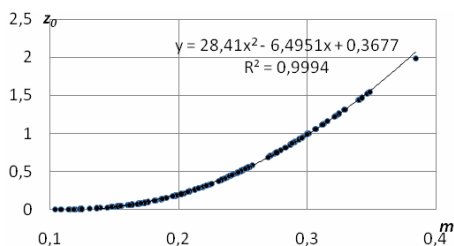


Рис. 3. Связь параметров Z_o и m

Связь между параметрами z_o и m , установленная по всей совокупности средних месячных значений скорости ветра на уровне флюгера и высоте 100 м всех привлеченных к исследованию пунктов наблюдения, практически функциональная, величина достоверности аппроксимации $R^2 \approx 1$, поэтому детализировать эту связь по времени и пространству нет необходимости. Зависимость между z_o и m , ввиду несущественных расхождений, целесообразно принять для средних годовых и месячных значений в виде:

$$z_o = 29,1m^2 - 6,8m + 0,4. \quad (3)$$

Выявленная нами зависимость, позволяет осуществить однозначный взаимный переход от одного параметра к другому, а мало физически обоснованному параметру m придать более сложный физический смысл, выражающийся через шероховатость подстилающей поверхности. Кроме того отметим, что, как следует из рис. 3 значение параметра m для большого числа метеостанций существенно выше 0,2, рекомендованного [12, 20, 21] в качестве базового при расчетах средней скорости ветра на высотах приземного слоя атмосферы с привлечением степенной формулы.

1. Белокрылова Т.А. Об изменении скоростей ветра на территории СССР // Труды ВНИИГМИ-МЦД, 1989, вып. 150, с. 38-47.
2. Берлянд М.Е. Теория изменения ветра с высотой // Труды НИУ ГУГМС, 1947. Сер. 1. Вып. 25.
3. Борисенко М.М. Вертикальные профили ветра и температуры в нижних слоях атмосферы // Труды ГГО. 1974. Вып. 320. – 205 с.
4. Борисенко М.М., Заварина М.В. Вертикальные профили, ветра по измерениям на высотных

- мачтах // Труды ГГО, 1967, вып. 210.
5. *Борисенко М.М., Кравченко И.К.* Некоторые результаты исследований режима сильных ветров на Балтике и на северо-западе Европейской территории СССР // Труды ЗСРНИГМИ, 1979. Вып. 45, с. 41-51.
 6. *Борисенко М.М., Соколова С.Н., Корнюшин О.Г.* Исследование климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов // Гидрометеорология и метеорология: Обзорная информация. ВНИИГМИ-МЦЦ, 1987, № 4. – 50 с.
 7. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1989.
 8. *Бызова Н.Л., Лунина А.А., Хачатурова Л.М.* О восстановлении профилей ветра по данным наземной метеостанции // Труды ИЭМ, 1987. Вып. 41(126), с. 25-50.
 9. Ветроэнергетика: Новейшие разработки (Под ред. Д. де Рензо. пер. с англ.). – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.
 10. *Дубов А.С., Быкова Л.П., Марунич С.В.* Турбулентность в растительном покрове. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 105 с.
 11. *Заварина М.В., Цвєрава В.Г.* О вертикальном распределении сильных ветров в пограничном слое атмосферы // Труды ГГО, 1966. Вып. 200, с. 94-103.
 12. *Заварина М.В.* Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 162 с.
 13. Климатические данные по пограничному слою атмосферы. Вып. 1. Скорость ветра в нижнем 100-метровом слое воздуха в условиях равнинной местности ЕТС. – М.: НИИАК, 1968. – 64 с.
 14. *Лайтхман Д.Л., Орленко Л.Р., Цейтлин Т.Х.* Методы оценки ветровых ресурсов по полю давления // Методы разработки ветроэнергетического кадастра. – М.: Изд. АН СССР, 1963, с. 5-25.
 15. Материалы высотных метеорологических наблюдений. Часть I-II. – М.: ЦВГМО, 1976-1985.
 16. Метеорологический режим нижнего трехсотметрового слоя атмосферы. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – 83 с.
 17. Новый аэроклиматический справочник пограничного слоя атмосферы над СССР. Т. 2. Статистические характеристики ветра. Книги 1-10. – М.: Гидрометеиздат, 1986. – 184 с.
 18. *Орленко Л.Р.* Строение пограничного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 270 с.
 19. Пограничный слой атмосферы. Труды ИПГ. Вып. 2. Данные наблюдений за 1962-1963 гг. – Л.: Гидрометеиздат, 1965.
 20. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок. Методические указания. Руководящий документ. – М.: Госкомгидромет, 1991. 57 с.
 21. Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 80 с.
 22. *Сапожникова С.А.* Изменение скорости ветра с высотой в нижнем слое воздуха // Труды НИУ ГУГМС, 1946. Сер. 1. Вып. 33. – 103 с.
 23. *Симонов Н.В.* Запасы энергии ветра Казахстана // Материалы для изучения естеств. производ. сил СССР, 1927, № 62, с. 14-23.
 24. *Склярв В.М.* Ветер в пограничном слое атмосферы над территорией СССР. Ч. 1. Европейская территория СССР. – М.: НИИАК, 1968. – 476 с.
 25. *De Marrais S.A.* Wind profile at Brookhaven national laboratory // J. Meteorology, Apr. 1959, vol. 16, № 2, p. 117-123.
 26. *Diem M., Z edler P.* Der Wind in der Bodennahen Schicht bis 100 m. // Höhe in Karlsruhe und Mühlacker. Berichte Deutsch. Wetterdienst., 1964, № 97, Bd. 13.
 27. *Palutikof J.P., Kelly P.M., Davles T.O., Halliday I.A.* Impacts of spatial and temporal wind speed variability on wind energy output. // J. Climate Appl. Meteorol., 1987. Vol. 26. № 9. p. 1124-1133.
 28. *Tosha M* On the Wind speed profile in the lower atmosphere // Pap. Met. Geophys., Dec. 1953, vol. 4, № 3-4, p. 248-260.