

Введение

Для решения задач метеорологии, экологии, энергетики особый интерес представляет профиль скорости ветра (закон изменения скорости ветра с высотой) и коэффициент турбулентной диффузии, которые существенным образом зависят от рельефа местности. В частности, крупные источники загрязнения - электростанции, металлургические, химические и другие предприятия обычно строятся вблизи водоемов в низинах. Жилые массивы чаще располагаются на возвышенностях. При ветре со стороны предприятий в атмосферном воздухе жилых кварталов создаются значительные концентрации вредных веществ. В пониженных формах рельефа застаивается воздух, что тоже приводит к усилению опасности загрязнения в данных местах. Под влиянием неровностей местности изменяется турбулентный режим воздушных потоков, который характеризуется коэффициентом турбулентной диффузии.

Разработаны различные математические модели, учитывающие изменение скорости ветра и вертикального коэффициента турбулентной диффузии с высотой в приземном слое атмосферы (ПСА). Экспериментальные исследования показали, что в приземном слое атмосферы толщиной несколько десятков метров для скорости ветра с хорошей точностью выполняется логарифмический закон. Влияние рельефа местности в этой зависимости учитывается с помощью параметра шероховатости подстилающей поверхности z_0 , который является подгоночным параметром по измеренному профилю скорости. Величина z_0 входит также как параметр в некоторые расчетные формулы для вертикального коэффициента турбулентной диффузии. Необходимо отметить, что эти формулы широко используются в метеорологии. Значения z_0 , зависящие не только от рельефа местности, но и состояния атмосферы, измерены для простейших типов рельефа и конкретных состояний атмосферы. Однако, имеется ряд важных задач, когда необходимо знать некоторое усредненное по разным состояниям атмосферы значение

параметра шероховатости для сложного рельефа местности. К таким задачам относятся: 1) изучение пространственного распределения загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов; 2) оценка и прогнозирование среднегодовых уровней загрязнения атмосферного воздуха; 3) оценка ресурса энергии ветра для прогнозирования поперечных нагрузок на лопасти турбины ветроэнергетической установки.

Целью данной работы является изучение влияния рельефа местности на профиль скорости ветра и коэффициент вертикальной диффузии. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить методы аппроксимации профиля скорости ветра в приземном слое атмосферы, провести их сравнение.
2. Изучить методы определения вертикального коэффициента турбулентной диффузии.
3. Изучить методы определения параметра шероховатости.
4. Провести оценку параметра шероховатости, используя результаты обработки функций распределения загрязняющих веществ.
5. Провести анализ полученных результатов.

1 Методы аппроксимации профиля скорости ветра в приземном слое атмосферы и их сравнение

Характеристика профиля скорости ветра до высот около 200 м имеет важное значение для решения различных прикладных задач, включая оценку и прогнозирование уровня загрязнения атмосферного воздуха, а также оценку ветроэнергетических ресурсов.

Многочисленные эксперименты по измерению профиля скорости ветра показали, что зависимость этой величины от высоты имеет логарифмический вид. Вблизи поверхности земли воздушные потоки тормозятся трением, которое создают неровности подстилающей поверхности. В моделях влияние неоднородности поверхности учитывается путем введения параметра шероховатости, определяемого на основе измерений ветра на разных высотах. С удалением от поверхности Земли эффект трения уменьшается и скорость ветра возрастает.

Теория подобия Монин – Обухова (MOST) рассматривается как самая простая из моделей и используется для моделирования профиля скорости ветра на высотах, относящихся к приземному слою воздуха [6]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}, \frac{z_0}{L}\right) \right], \quad (1.1)$$

где u_* - скорость трения;

z_0 - параметр шероховатости;

κ - константа Кармана (обычно принимают равной 0,4);

L – длина Монина - Обухова; зависит от состояния атмосферы;

ψ_m характеризует угол поворота скорости ветра, зависит от состояния атмосферы:

$$\psi_m\left(\frac{z}{L}, \frac{z_0}{L}\right) = \int_{z_0/L}^{z/L} \frac{1 - \phi_m(\zeta)}{\zeta} d\zeta, \quad (1.2)$$

ϕ_m – угол поворота скорости ветра на высоте z' ; $\zeta = z'/L$.

При $\psi_m \neq 0$, уравнение (1.1) является не строго логарифмическим, однако, его используют как «логарифмический закон для скорости ветра». Предположение о том, что u_* и L постоянны с высотой, ограничивает применимость логарифмического профиля скорости ветра в ПСА, т.к. с высотой изменяется стратификация атмосферы. Несмотря на некоторые ограничения данная модель часто используется в стабильных условиях для прогнозирования и оценки ресурсов энергии ветра на высотах в пределах нескольких сотен метров от поверхности.

Модель местного подобия является продолжением теории подобия Монина – Обухова выше поверхностного слоя. Ее основная предпосылка состоит в том, что статистика турбулентности на заданной высоте может быть определена на основе локальных наблюдений на поверхности так же, как в MOST. Для местной модели подобия потоки импульса и полученные длины Монина – Обухова измеряют при 5, 60, 100, и 180 м и линейно интерполируются к серединам между высотами измерения ветра (т.е. 15, 30, 60, 100, и 170 м). Скорость ветра на 20 м вычисляется по скорости ветра на 10 м и потока на 15 м, после которого скорость ветра на 40 м вычисляется по скорости ветра на 20 м и потока на 30 м и так далее. Тогда профиль скорости ветра между двумя соседними высотами ($z_2 > z_1$) описывается следующим образом [6]:

$$u(z_2) = u(z_1) + \frac{\sqrt{(\tau/\rho_0)l}}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_2}{L_l}, \frac{z_1}{L_l}\right) \right], \quad (1.3)$$

где $(\tau/\rho_0)l$ – локальный поток импульса.

Модель местного подобия, как и MOST, основана на предположении о непрерывной турбулентности и становится недействительной при устойчивом режиме, когда турбулентность практически отсутствует. Требуя данные о потоке на многих высотах, модель является информационно емкой. Однако,

практическое применение ограничено, т.к. большое количество данных редко доступно.

В работе [7] показано, что в приземном слое профиль ветра с хорошей точностью описывается следующей логарифмической зависимостью:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left[\frac{z - d_0}{z_0} \right], \quad (1.4)$$

где z – высота;

d_0 - высота перемещения.

Параметр z_0 определяет масштаб высоты, на которой действуют силы трения, d_0 характеризует шкалу вертикального распределения этих сил в поверхностном слое. Были предложены методы определения z_0 и d_0 на основе информации о поверхностной морфометрии. Под морфометрией понимаются методы, в которых принимают во внимание изменение данных параметров с изменением плотности застройки и в которых определяются параметры шероховатости по разным направлениям ветра. Однако, чаще используются эмпирические параметры z_0 и d_0 , выраженные через среднюю высоту застройки H ($z_0 = 0,1H$ и $d_0 = 0,7H$).

При применении формулы (1.4) значения z_0 и d_0 определяются с помощью морфометрического или анеометрического метода [9], причем для определения d_0 требуется измерить скорость ветра на двух или более высотах. В качестве альтернативы формуле (1.4) в работе [7] была предложена формулировка PML15 для $u(z)$, в которой вместо подгоночных констант z_0 и d_0 предложено использовать параметр $z_{0L}(z)$, который авторы называют местной шкалой расстояний:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left[\frac{z}{z_{0L}(z)} \right], \quad (1.5)$$

где

$$z_{0L}(z) = \alpha \exp\left[-\frac{z}{L_c}\right] + \gamma. \quad (1.6)$$

Здесь величины α , L_c и γ – эмпирические параметры, определяемые из экспериментальных данных.

Параметр z_0 в формуле (1.4) – константа интегрирования вертикального градиента скорости ветра $\frac{\partial u}{\partial z}$ и принимается как функция особенностей ландшафта. В противоположность, $z_{0L}(z)$ определяется на основе абсолютно другого подхода и может быть рассмотрен как новая переменная, которая выполняет ту же самую роль, которую играют d_0 и z_0 в уравнении (1.4).

Недостаток PML15 – в этой модели вместо двух эмпирических параметров (d_0 , z_0) вводится три (α , L_c , γ). Кроме того, эмпирические коэффициенты модели α , L_c , γ , измеренные на каком – либо участке, нельзя использовать на других городских участках. Другими словами, параметры α , L_c , γ не выражены с точки зрения подходящих масштабных коэффициентов и их можно применять только для конкретного ветроэнергетического сектора. Этот недостаток авторы статьи пытались устранить путем введения соответствующих масштабов, в котором u^* принимает масштаб скорости, а H – средняя высота здания и λ_p – модальное значение однородной части области[7]:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left[\frac{z/H}{\frac{1}{\kappa \alpha} \exp \left[-\frac{z/H}{\beta(\lambda_p) * \ln(u^*) + \delta(\lambda_p) + 1/\kappa \gamma} \right]} \right]. \quad (1.8)$$

Однако, для определения этих масштабов на основе измерений необходимо определить уже 6 эмпирических констант, т.к. $\beta(\lambda_p)$ и $\delta(\lambda_p)$ определяются по формулам:

$$\beta(\lambda_p) = \beta_0 * \exp[-\beta_1 * \lambda_p], \quad (1.8a)$$

$$\delta(\lambda_p) = \delta_0 * \exp[-\delta_1 * \lambda_p], \quad (1.8b)$$

Здесь $\beta_0, \beta_1, \delta_0, \delta_1, k_\alpha$ и k_γ - параметры, определенные в результате подгонки к экспериментальным данным.

Стоит заметить, что при применении формулы (1.8) требуются те же данные, которые необходимы для использования других формулировок скорости ветра, основанных на уравнении (1.4), в которое входят значения d_0 и z_0 .

Как показано выше, за рубежом используют целый ряд моделей разной степени сложности. Однако, такие модели зачастую бывают трудоемкими и финансово дорогостоящими, что затрудняет их применение в ситуациях, в которых необходимы быстрые и экономически эффективные методы оценки энергии ветра.

В отечественной литературе для аппроксимации зависимости скорости ветра от высоты в ПСА также используют логарифмическую зависимость[1]:

$$u(z) = u_1 \frac{\ln(\frac{z}{z_0})}{\ln(\frac{z_1}{z_0})}, \quad (1.9)$$

Вблизи земли, когда z_0 сопоставимо с z , Матвеев Л.Т. предлагает более точную формулировку логарифмического закона [4]:

$$u(z) = u_1 \frac{\ln(\frac{z+z_0}{z_0})}{\ln(\frac{z_1+z_0}{z_0})}, \quad (1.10)$$

Большинство экспериментальных данных показывают, что логарифмический закон выполняется с высокой точностью до нескольких

сотен метров. Однако, при данной зависимости решение диффузионно – конвективного уравнения переноса загрязняющих примесей может быть получено только численным методом. Аналитическое решение уравнения переноса удастся получить при степенной зависимости скорости ветра от высоты:

$$u(z) = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad (1.11)$$

где n – безразмерный показатель, численное значение которого зависит от состояния атмосферы; в работе [1] рекомендуются значения $n = 0,1 \dots 0,2$.

Параметры z_0 и n зависят от турбулентности, стратификации атмосферы и местных физико – географических условий.

В данном исследовании при изучении влияния рельефа местности на профиль скорости ветра и коэффициент турбулентности использовано аналитическое решение диффузионно - конвективного уравнения переноса, которое получено при степенной зависимости скорости от высоты, поэтому для выяснения диапазона значений n и z_0 , при которых логарифмическая и степенная зависимости дают примерно одинаковый результат, был произведен расчет скорости ветра в зависимости от высоты по формулам (1.4) и (1.5) при разных значениях n и z_0 ; полученные результаты приведены на рис.1.

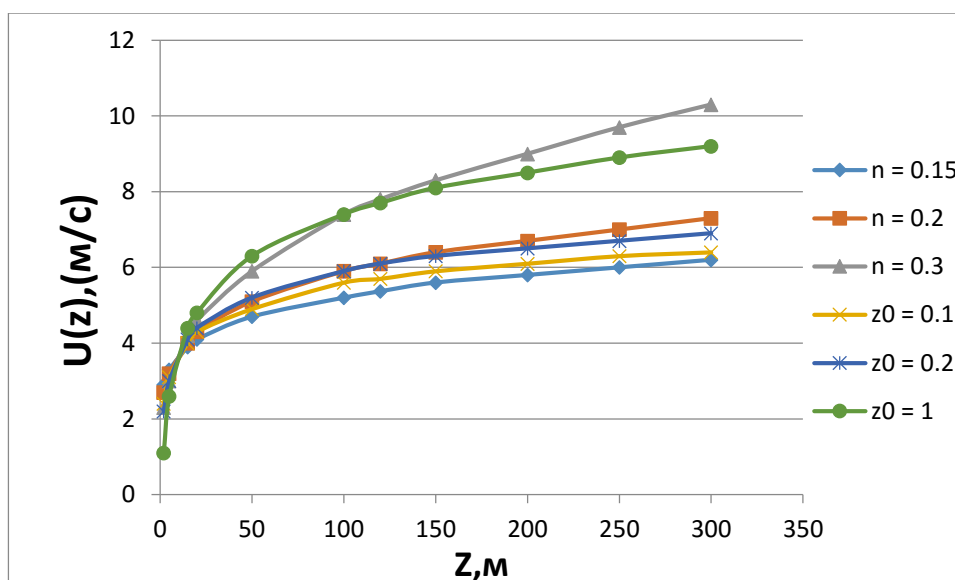


Рис.1. Зависимость скорости ветра от высоты при разных значениях n и z_0 .

Из рисунка видно, что при ровной подстилающей поверхности $z_0 \leq 0,2$ м и устойчивом состоянии атмосферы (рекомендованные значения $n = 0,15 \dots 0,2$) обе зависимости позволяют получить примерно одинаковый результат. Однако, для существенно неровной поверхности ($z_0 = 1$ м) степенная зависимость неплохо согласуется с логарифмической при большем значении $n = 0,3$.

В дальнейшем полученные результаты будут использоваться для расчетов коэффициента пропорциональности турбулентной диффузии и параметра шероховатости для ТЭЦ г. Новосибирска и г. Барнаула. В Новосибирске местность сравнительно однородная, т.к. на протяжении 2 км от ТЭЦ располагается лесной массив, который далее разрежен небольшими участками с низкой растительностью. Поэтому при математической обработке результатов для Новосибирска использовано значение $n = 0,2$. В отличие от Новосибирска поверхность в Барнауле существенно неоднородная – в исследованном направлении имеются препятствия в виде лесополос на расстояниях примерно 500 м друг от друга, поэтому в данном случае принимаем $n = 0,3$.

2 Методы определения вертикального коэффициента турбулентной диффузии

При планировании пространственного распределения загрязнений в атмосферном воздухе широко используется теория градиентного переноса. Она характеризуется коэффициентом турбулентной диффузии k при моделировании турбулентности в приземном слое атмосферы. Из-за трения вихревых потоков с шероховатой поверхностью можно пренебречь диффузией в горизонтальной плоскости по сравнению с переносом за счет ветра. В этом случае диффузионный перенос осуществляется только в вертикальном направлении и характеризуется коэффициентом k_z .

Определить непосредственно на заданной высоте z коэффициент вертикальной диффузии выбросов промышленных предприятий в приземном слое атмосферы можно по формуле [3]:

$$k_z = B(\varepsilon, z_0) z_1 u_z \left(\frac{z}{z_1} \right)^{1-\varepsilon}, \quad (2.1)$$

где $B(\varepsilon, z_0)$ – табулированная в зависимости от параметров ε и z_0 функция;

ε – параметр, характеризующий температурную стратификацию атмосферы;

z_0 – параметр шероховатости;

z_1 – высота от поверхности земли и обычно равная 1 м;

u_1 – скорость ветра на высоте z_1 .

Для применения формул (2.1) нужно провести измерение скорости ветра на высоте z_1 , а также определить температурный градиент (измерение температуры на разных высотах).

По формуле Сольберга можно определить коэффициент вертикальной диффузии выбросов промышленных предприятий в приземном слое атмосферы на заданной высоте z [1]:

$$k_z = \frac{R_n r}{\left(\frac{d\sigma(z)}{dz} \right)^2}, \quad (2.2)$$

где R_n – нормальная составляющая силы внутреннего трения атмосферных потоков;

$\sigma(z)$ – длина дуги годографа количества движения атмосферного воздуха, отсчитываемая от точки, соответствующей уровню земли;

z – высота от поверхности земли, на которой определяется коэффициент вертикальной диффузии выбросов промышленных предприятий в приземном слое атмосферы;

r – радиус кривизны годографа.

Для применения формулы Сольберга необходимо произвести измерения на разных высотах скорости ветра, плотности воздуха и атмосферного давления.

Существует ряд способов, при которых для определения коэффициента k_z используется коэффициент вертикальной диффузии на единичном уровне. Так, например, согласно М. И. Будыко в приземном слое атмосферы [2]:

$$k_z = k_{1p} \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \overline{Ri}}, \quad (2.3)$$

где k_{1p} – значение k_z на единичной высоте z_1 при равновесных условиях,
 $\overline{Ri}$ – среднее по пограничному слою значение числа Ричардсона:

$$Ri = \frac{g \frac{\partial T}{\partial z}}{T_a \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2}, \quad (2.4)$$

T – температура воздуха в градусах;

T_a – температура в абсолютной шкале;

g – ускорение силы тяжести.

При логарифмическом распределении скорости ветра и температуры в приземном слое воздуха (2.3) принимает вид:

$$k_z = k_{1p} \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \frac{hg}{T_a} \cdot \frac{\ln^2 \frac{z_1}{z_0}}{\ln \frac{z_3}{z_2}} \cdot B}, \quad (2.5)$$

где B – параметр устойчивости, введенный М.И. Будыко, $B = \frac{\delta T}{u_1^2}$;

$$k_{1p} = \frac{\chi^2 u_1}{\ln \frac{z_1}{z_0}} \sqrt{1 - Ri}, \quad (2.6)$$

δT – разность температур на высотах z_3 и z_2 ,

χ – постоянная Кармана ($\chi = 0,38 \dots 0,4$);

h – высота приземного слоя атмосферы, не имеет однозначного значения и изменяется в достаточно широких пределах в зависимости от термической стратификации, величины скорости ветра, а также от шероховатости поверхности.

При равновесном состоянии, когда B приблизительно равно 0, формула (2.5) переходит в формулу Россби и Монтгомери:

$$k_z = k_{1p} \frac{z}{z_1}, \quad (2.7)$$

Д. Л. Лайхтман также разработал способ определения коэффициента k_z при помощи коэффициента пропорциональности вертикальной диффузии. По Д.Л. Лайхтману вертикальный коэффициент турбулентной диффузии k_z определяют как функцию устойчивости атмосферы и высоты над подстилающей поверхностью [3]:

$$k_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{1-\varepsilon} \quad (2.8)$$

где k_1 - коэффициент диффузии на высоте z_1 , который рассчитывается по данным метеонаблюдений на высоте z_1 ;

ε – параметр устойчивости, характеризующий термическую стратификацию атмосферы; по экспериментальным данным ε в интервале от 0,01 до 0,25.

В данном исследовании использована линейная зависимость от высоты, при которой получено аналитическое решение диффузионно – конвективного уравнения переноса:

$$k_z = k_{\text{пр}} z, \quad (2.9)$$

где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент пропорциональности вертикальной диффузии, зависящее от состояния атмосферы и рельефа местности.

Уравнение переноса для приземного слоя атмосферы имеет вид:

$$u \frac{\partial q}{\partial x} + V_g \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (2.10)$$

где $q(x)$ – средняя концентрация примеси, на расстоянии x от источника;

u – скорость ветра в направлении оси x ;

V_g – скорость гравитационного оседания частиц примеси.

Его решение при степенной аппроксимации скорости ветра (1.11) и линейной зависимости вертикального коэффициента турбулентной диффузии от высоты (2.9) для точечного источника записывается следующим образом [1]:

$$q(x) = Ax^{\theta_1} \exp\left(-\frac{\theta_2}{x}\right) + q_\phi, \quad (2.11)$$

где q_ϕ - фоновые концентрации,

A , θ_1 , θ_2 – параметры распределения загрязняющих веществ, зависящие от мощности и режима работы предприятия, состояния атмосферы и свойств загрязняющей примеси.

В работе [1] получено выражение для параметра θ_2 :

$$\theta_2 = \frac{\overline{u_1} (H/z_1)^n H}{(1+n)^2 \kappa_{np}}, \quad (2.12)$$

где H – высота трубы источника загрязнения;

$\overline{u_1}$ - скорость ветра, усредненная за период экспозиции.

Численное значение параметра θ_2 определяется методом наименьших квадратов при аппроксимации измеренных вдоль некоторого направления x

концентраций загрязняющих веществ от точечного источника[12]. Тогда коэффициент пропорциональности k_{np} можно рассчитать по формуле:

$$k_{np} = \frac{\overline{u_1} (H/z_1)^n H}{(1+n)^2 \theta_2}. \quad (2.13)$$

В нашем исследовании измерения функций распределения $q(x)$ проведены методом мхов – биоиндикаторов (время экспозиции составляло 3 года), результаты представлены в работе [12].

По формуле (2.13) был рассчитан коэффициент пропорциональности турбулентной диффузии для угольной ТЭЦ-5 в городе Новосибирск и для угольной ТЭЦ-3 в городе Барнаул. Расчет проведен при $z_1 = 10$ м, скорости ветра $\overline{u_1} = 4,9$ м/с и $3,5$ м/с для Новосибирска и Барнаула соответственно, высота трубы в г. Новосибирск - 260 м, в г. Барнаул - 230 м. По результатам, полученным в пункте 1 данной работы, при расчете k_{np} использованы значения параметра $n = 0,2$ для Новосибирска и $n = 0,3$ для Барнаула.

$$\bar{k}_{np(Нов)} = 0,21 \text{ м/с}, \quad \bar{k}_{np(Бар)} = 0,38 \text{ м/с}.$$

Полученные значения коэффициента пропорциональности турбулентной диффузии являются усредненными значениями по всем химическим элементам для исследованных территорий. Необходимо отметить, что эти значения учитывают рельеф местности в заданном направлении, а также реализацию всех состояний атмосферы за период экспозиции.

Известно, что интенсивность турбулентного переноса увеличивается с ростом скорости ветра. Средняя скорость ветра в Барнауле в 1,4 раза меньше, чем в Новосибирске. Однако, коэффициент турбулентности, полученный в этом городе в 1,8 раз больше, чем в Новосибирске. Следовательно, на значение

коэффициента турбулентности большое влияние оказывает рельеф местности, который для Барнаула является более неоднородным, чем для Новосибирска.

3 Методы определения параметра шероховатости

Как отмечено выше, параметр шероховатости, характеризующий рельеф местности, определяется экспериментально по измеренному градиенту скорости и приводится в литературе для некоторых типов местности (табл. 3.1) [15]. Очевидно, реальную урбанизированную местность чаще всего нельзя отнести к какому-либо определенному типу.

Таблица 3.1 Значения параметра шероховатости для различных типов поверхности.

Тип поверхности	Z_0 , м
Песок	0,0001 – 0,001
Побережье	0,005 – 0,01
Снежный покров	0,001 – 0,006
Скошенная трава	0,001 – 0,01
Низкая трава(степь)	0,01 – 0,04
Высокая трава	0,04 – 0,1
Карликовые растения	0,1 – 0,3
Мелколесье	0,9 – 1
Открытая местность	0,03 – 0,1
Пригороды с редкой застройкой	0,2 – 0,4
Города, пригороды со сплошной застройкой	0,8 – 1,2
Центры крупных городов	2 - 3

Согласно А.С. Монину и А.М. Яглом [5] параметр шероховатости может быть определен при аппроксимации логарифмическим законом профиля ветра, измеренному при нейтральной или почти нейтральной стратификации:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (3.1)$$

В работе Берлянда[1] значение параметра шероховатости подстилающей поверхности приближенно оценивается как 1/7 – 1/10 часть от средней высоты неровностей подстилающей поверхности (табл. 3.1).

Однако, такая оценка параметра шероховатости является грубой, т.к. не учитывается влияние площади боковой поверхности препятствий. Поэтому в работе [10] предложено оценивать влияние отдельных доминирующих элементов шероховатости (например, деревьев):

$$z_0 \approx 0,5 \frac{HS}{A}, \quad (3.2)$$

где A - площадь поверхности, где располагается доминирующее препятствие;

H – высота препятствия;

S - площадь боковой поверхности препятствия.

Из уравнения (3.2) следует, что не только высота H , но и площадь препятствия боковой поверхности является важным фактором при оценке параметра шероховатости.

По Д.Л. Лайхтману параметр шероховатости подстилающей поверхности можно определить по формуле [3]:

$$z_0 = \frac{1}{\kappa^2 \chi R_0}, \quad (3.3)$$

где χ – геострофический коэффициент трения;

R_0 - число Росби, используемое для описания геофизических явлений атмосфере

Параметр аэродинамической шероховатости также может быть определен с помощью коэффициента поверхностного трения, обусловленного взаимодействием какой – либо неоднородности поверхности со скоростью ветра на высоте z [11]:

$$z_0 = z \exp\left[\sqrt{C_{D(z)}/\kappa^2}\right], \quad (3.4)$$

где $C_{D(z)}$ - коэффициент поверхностного трения [15].

В работе [6] использовались разные подходы в определении параметра шероховатости Z_0 , которые подчеркивают роль Z_0 как настраиваемого параметра. Для модели подобия Монина - Обухова использовались значения Z_0 , основанные на местных данных землепользования, чтобы получить точные результаты для профиля ветра в низких высотах. Как следствие модель была неточна на больших высотах. Если использовать региональные значения Z_0 , то точность на больших высотах улучшается, но в более низких высотах ухудшается.

4 Оценка параметра шероховатости на основе математической обработки функций распределения загрязняющих веществ

В данном исследовании оценка параметра шероховатости проводится на основе измеренных вдоль некоторого направления функций распределения загрязняющих веществ от точечного высотного источника загрязнения и формулы для коэффициента пропорциональности для равновесных условий [4]:

$$k_{np} = \kappa^2 \frac{\overline{u_1}}{\ln(\frac{z_1}{z_0})}. \quad (4.1)$$

Выразим параметр шероховатости из формулы (4.1):

$$z_0 = z_1 * \text{Exp} [-(\frac{\kappa^2 * \overline{u_1}}{k_{np}})]. \quad (4.2)$$

В качестве источников загрязнения рассмотрены угольные ТЭЦ городов Новосибирск и Барнаул.

По формуле (4.2) был рассчитан параметр шероховатости для угольной ТЭЦ-5 в городе Новосибирск и для угольной ТЭЦ-3 в городе Барнаул:

$$\bar{z}_{0(Hов)} = 0,34 \text{ м}; \quad \bar{z}_{0(Hов)} = 2,6 \text{ м}.$$

Расчет проведен при средней скорости ветра, измеренной на высоте $z_1 = 10 \text{ м}$: $\overline{u_1} = 4,9 \text{ м/с}$ и $\overline{u_1} = 3,5 \text{ м/с}$ для Новосибирска и Барнаула соответственно. [14]. При расчете использованы усредненные по всем химическим элементам значения коэффициента пропорциональности, полученные в пункте 2 ($\bar{k}_{np} = 0,38 \text{ м/с}$ для Барнаула и $\bar{k}_{np} = 0,21 \text{ м/с}$ для Новосибирска).

Очевидно, значения $\bar{z}_0$ определяют некие усредненные параметры шероховатости, характеризующие степень неоднородности исследованных территорий в выбранных направлениях. Необходимо отметить, что полученные значения параметра шероховатости согласуются с табличными данными (табл. 3.1) для характерных типов рельефа, где расположены ТЭЦ. Территория от ТЭЦ – 5 города Новосибирска на расстоянии примерно 2 км практически однородна, для такого рельефа табличные значения z_0 находятся в интервале 0,2...0,4 м. Поверхность в Барнауле существенно неоднородная, имеются препятствия в виде лесополос; рекомендуемый для данного вида местности диапазон значений составляет $z_0 = 2...3$ м.

Заключение

В ходе дипломной работы выполнено следующее:

1. Проведен обзор литературы, в том числе иностранной, по методам аппроксимации скорости ветра, методам определения коэффициента вертикальной диффузии и параметра шероховатости.

2. Разработан метод оценки параметра шероховатости, основанный на математической обработке функций распределения загрязняющих веществ угольных ТЭЦ.

3. Проведена оценка параметра шероховатости для исследованных территорий Новосибирска и Барнаула.

4. Проведен анализ полученных результатов.

На основе анализа результатов, полученных в исследовании, сделаны следующие выводы:

1. Рекомендуемые в литературе значения параметра $n = 0,15 \dots 0,2$, определяющего профиль скорости ветра, можно использовать для ровной подстилающей поверхности, для которой параметр шероховатости $z_0 \leq 0,2$ м.

2. Степенная функция для скорости ветра от высоты при существенно неоднородной поверхности согласуется с логарифмической зависимостью при $n = 0,3$.

3. Степень влияния рельефа местности на значение коэффициента турбулентности выше, чем скорости ветра.

4. Полученные значения параметра шероховатости согласуются с табличными данными, приведенными в литературе для рельефов, характерных для Барнаула и Новосибирска.