

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА СРЕДНЕГО ВЕТРА В ПОГРАНИЧНОМ АТМОСФЕРНОМ СЛОЕ

*С. М. Ульянов, М. Ю. Гвоздик, М. А. Гвоздик, Е. В. Недоспасова, Н. И. Гуляева*

ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск

## РАСЧЕТЫ, СРЕДНИЙ ВЕТЕР, ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ АТМОСФЕРЫ

В работе представлен обзор методик расчета вертикального профиля скорости ветра в пограничном атмосферном слое. Эти методики отличаются различным уровнем сложности и количеством используемых табличных данных. Наш собственный анализ показал, что более универсальной и более близкой к экспериментальному среднему результату, является методика Росгидромета.

### Введение

Вопросы восстановления вертикальных профилей метеорологических величин в пределах пограничного слоя атмосферы по ограниченной метеорологической информации актуальны в связи с рядом практических задач: высотного строительства, ветроэнергетики, обслуживанием авиации, необходимостью расчетов рассеяния примеси, в том числе при авариях. Основными исходными данными при этом обычно служат результаты стандартных наземных метеорологических измерений в пункте, где требуется расчет, или же на некотором удалении от него, и дополненные синоптическими данными ближайшей аэрологической станции. Способы восстановления вертикальных профилей метеорологических величин в зависимости от конкретных прикладных задач могут различаться, поскольку в разных случаях различаются требуемое время осреднения профилей, точность восстановления и требуемые характеристики.

Такой количественный показатель как средний ветер в слое от нуля до высоты стабилизации облака необходимо определить, какой методикой следует пользоваться для восстановления профиля скорости ветра по ограниченной информации /1-8/.

### 1. Методики прогнозирования радиационной обстановки при авариях на открытой местности

Для расчета плотности загрязнения местности при аварийном подрыве ДМ на открытой местности по инженерной методике используется эмпирическая зависимость, полученная на основании полигонных экспериментов.

Более полную картину загрязнения местности и приземного слоя воздуха можно получить в результате численного решения трехмерного полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. В этих 2 методиках позволяют описывать процессы переноса и диффузии газообразных и аэрозольных примесей в заданном поле атмосферных течений.

#### 1.1. Постановка задачи

Инженерная методика оценки загрязнения местности при взрывной аварии и пожаре изложена в методических указаниях Федерального управления «Медбиоэкстрем» МУ 2.6.1.023-2000 /5/. Согласно этой методике плотность загрязнения местности при взрывной аварии представляется в виде суммы трех слагаемых:

$$S = S1+S2+S3$$

Здесь  $S1$  – загрязнение в центральной области взрыва,  $S2$  – загрязнение на следе пылевого столба,  $S3$  – дальний след радиоактивного облака.

### 1.2. Методика Росгидромета по расчету вертикального профиля ветра в пограничном слое

Существуют разные способы восстановления профилей скорости ветра по ограниченной информации. Если известно значение скорости ветра на уровне  $z = 10$  м, профиль ветра можно рассчитать по ветровым коэффициентам  $V_z/V_{10}$ . Эти коэффициенты существенно зависят от высоты над поверхностью земли, скорости геострофического ветра ( $u$ , следовательно, от  $V_{10}$ ), шероховатости подстилающей поверхности, характера стратификации. Влияние указанных факторов иллюстрирует рис. 1.

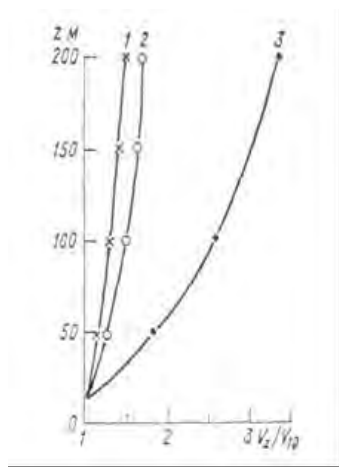


Рис. 1. Ветровые коэффициенты при нейтральной стратификации при разных значениях параметра  $z_0$  ( $V_g \approx 12$  м/с): 1 –  $z_0 = 0,07$  см (снег); 2 –  $z_0 = 2$  см (травяной покров); 3 –  $z_0 = 80$  см (город)

При нейтральной стратификации (что справедливо, прежде всего, при сильных ветрах) для восстановления профиля ветра в нижнем 100-метровом слое используется логарифмический закон изменения скоро-

сти ветра с высотой. Более общей формой является простой степенной закон

$$V_z/V_{10} = (z/z_1)^m, \quad (1)$$

где параметр  $m$  должен задаваться с учетом стратификации, скорости ветра на уровне  $z_1$ , шероховатости подстилающей поверхности, толщины рассматриваемого слоя, а также высоты  $z_1$ .

Рекомендуемый ниже Росгидрометом способ восстановления профилей скорости ветра требует следующую входную информацию: скорость ветра на высоте 10 м ( $u_0$ , м/с), класс устойчивости ( $P$ ), параметр шероховатости ( $z_0$ , м) и параметр Кориолиса ( $l$ , с<sup>-1</sup>). Расчет производится по следующей схеме. Определяется скорость трения по формуле

$$u_* = \frac{0.4u_{10}}{\ln(10/z_0) + A_p}, \quad (2)$$

### 2. Методика, рекомендованная Агентством по защите окружающей среды США (EPA)

Для расчетов рассеяния примеси по инженерным моделям, как правило, необходимо знать следующий минимальный набор метеопараметров: скорость ветра, его направление, высоту слоя перемешивания и класс устойчивости атмосферы.

Одна из простых моделей определения профиля скорости ветра, рекомендованная EPA, приведена в справочнике /3/.

Здесь отмечается, что для простых гауссовских инженерных моделей рассеяния примеси следует использовать среднюю по величине скорость между скоростью вблизи поверхности земли и скоростью на уровне стабилизации облака или дымного султана. При этом вблизи земли скорость ветра измеряется на высоте 10 м и затем производится экстраполяция ско-

рости ветра по высоте по следующему закону

$$U(z) = u_{10}(z/10)^p, \quad (3)$$

где  $z$  – высота (м)

$u_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 м.

При высоте стабилизации облака или султана выше 200 м ЕРА рекомендует принимать скорость ветра равной скорости на высоте 200 м.

### 3. Дополнительные методики расчета профиля скорости ветра

Еще одна из возможных методик расчета профиля скорости ветра изложена в руководстве пользователя программы NazBreeze для модуля SLAB /9/.

Согласно этой методике профиль скорости ветра может быть рассчитан из формулы

$$\frac{dU_a}{dz} = \frac{U_{a*}}{kz} \Phi_m(z/L) g(z/H), \quad (4)$$

где  $U_a$  – скорость ветра на заданной высоте

$U_{a*}$  – скорость трения,

$k$  – постоянная Кармана

$z$  – высота

$L$  – масштаб Монина-Обухова

$H$  – высота слоя перемешивания

$\Phi_m(z/L)$  – функция импульса Монина-Обухова

$g(z/H)$  – функция высоты слоя перемешивания

Функция  $g(z/H)$  рассчитывается как  $g(z/H) = 1 - z/H$ . При этом высота слоя перемешивания может быть рассчитана по формуле  $H = H(s) = 130 \cdot 2^{(7-s)}$ , где  $s$  – класс устойчивости атмосферы  $s = 1,6$  и соответствует классам А-Ф, соответственно.

Функция импульса Монина-Обухова для устойчивой и нейтральной атмосферы ( $s \geq 4$ ) записывается как /10/

$$\Phi_m(z/L) = 1 + 5 \cdot L^{-1} \cdot z / (1 + z/z_L(s)), \quad (5)$$

так что профиль скорости ветра в этом случае будет определяться формулой

$$U_a(z) = \frac{U_{a*}}{k} \left\{ \ln(z/z_0) - \frac{(z-z_0)}{H} + 5L^{-1}z_L \left[ \left(1 + \frac{z_L}{H}\right) \ln\left(\frac{z+z_L}{z_0+z_L}\right) - \frac{(z-z_0)}{H} \right] \right\}, \quad (6)$$

где  $U_{a*}$  – скорость трения,

$k$  – постоянная Кармана

$z_0$  – шероховатость поверхности

### 4. Сравнение методик и рекомендации по расчету

В качестве критерия было решено исходить из наибольшей близости к среднему результату по нескольким методикам или имеющимся экспериментальным данным и простоты использования.

Для начала было проведено сопоставление методики Росгидромета и американской NazBreeze для модуля SLAB /9/.

На рис. 2 показаны ветровые профили, определенные по двум указанным методикам. Видно, что, практически, для всех категорий устойчивости атмосферы и параметра шероховатости 0,1 м российская методика дает несколько большие скорости ветра на всех высотах. Соответственно средние значения скорости ветра также оказываются больше.

Дальнейшее сравнение расчетных методик проводилось по сопоставлению с экспериментальными аэрологическими измерениями, выполненными на полигоне Донгуз сотрудниками ВНИИТФ в течение трех лет /11/. Объем этих прямых измерений составил порядка 220 шар-пилотных измерений для теплого времени года и 180 – для холодного (рис. 2–6).

Видно, что наилучшее согласие с экспериментом дает методика Росгидромета.

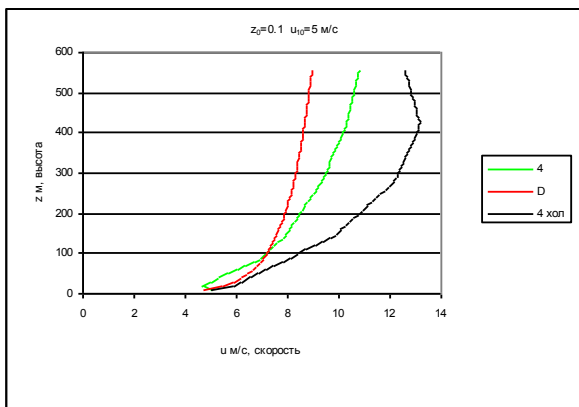
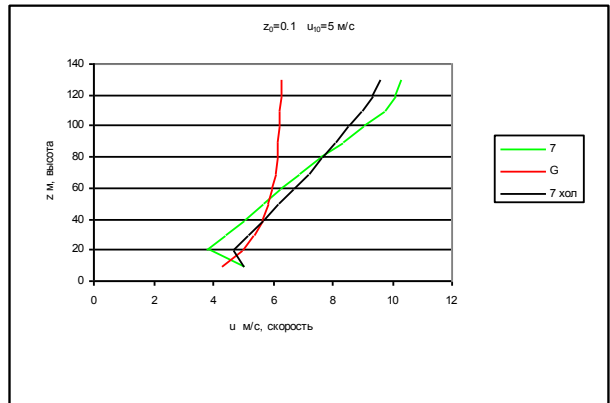
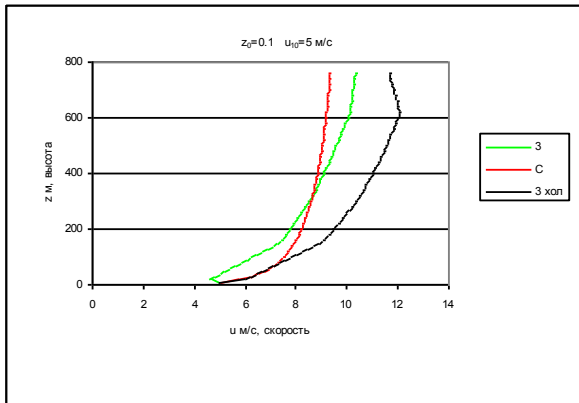
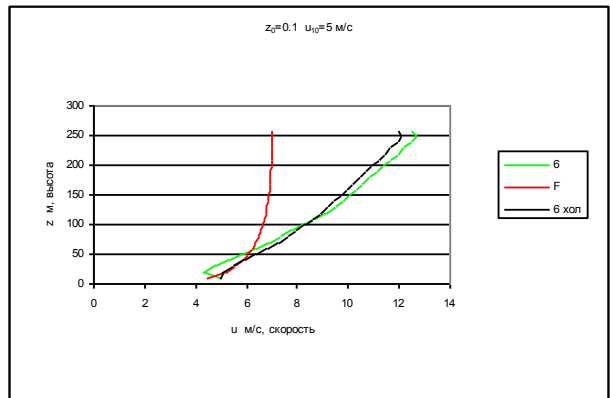
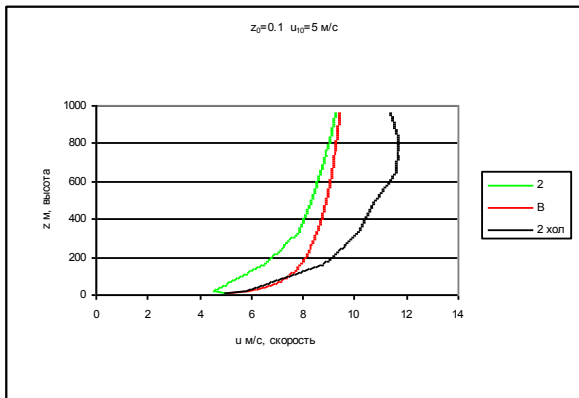
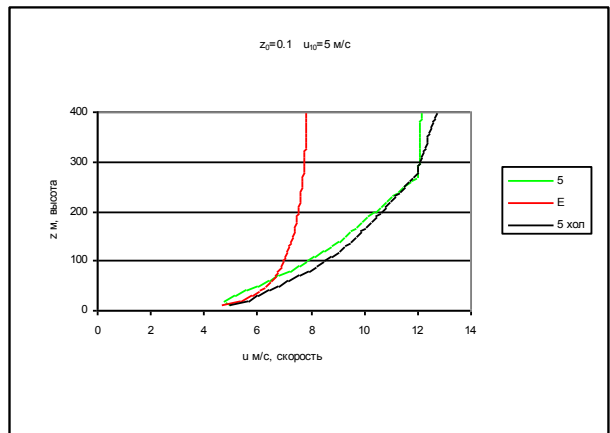
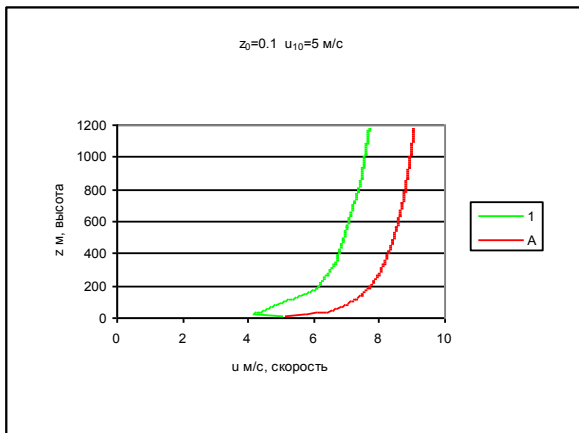


Рис. 2. Ветровые профили, определенные по российской и американской методикам, для  $u_{10} = 5$  м/с и шероховатости  $z = 0,1$  м:

1, 2 ... 7 – классы устойчивости атмосферы по классификации Росгидромета

B, C, D, E, F, G – классы устойчивости атмосферы по Пасквилю

— — российская методика, теплый сезон

— — российская методика, холодный сезон

— — американская методика

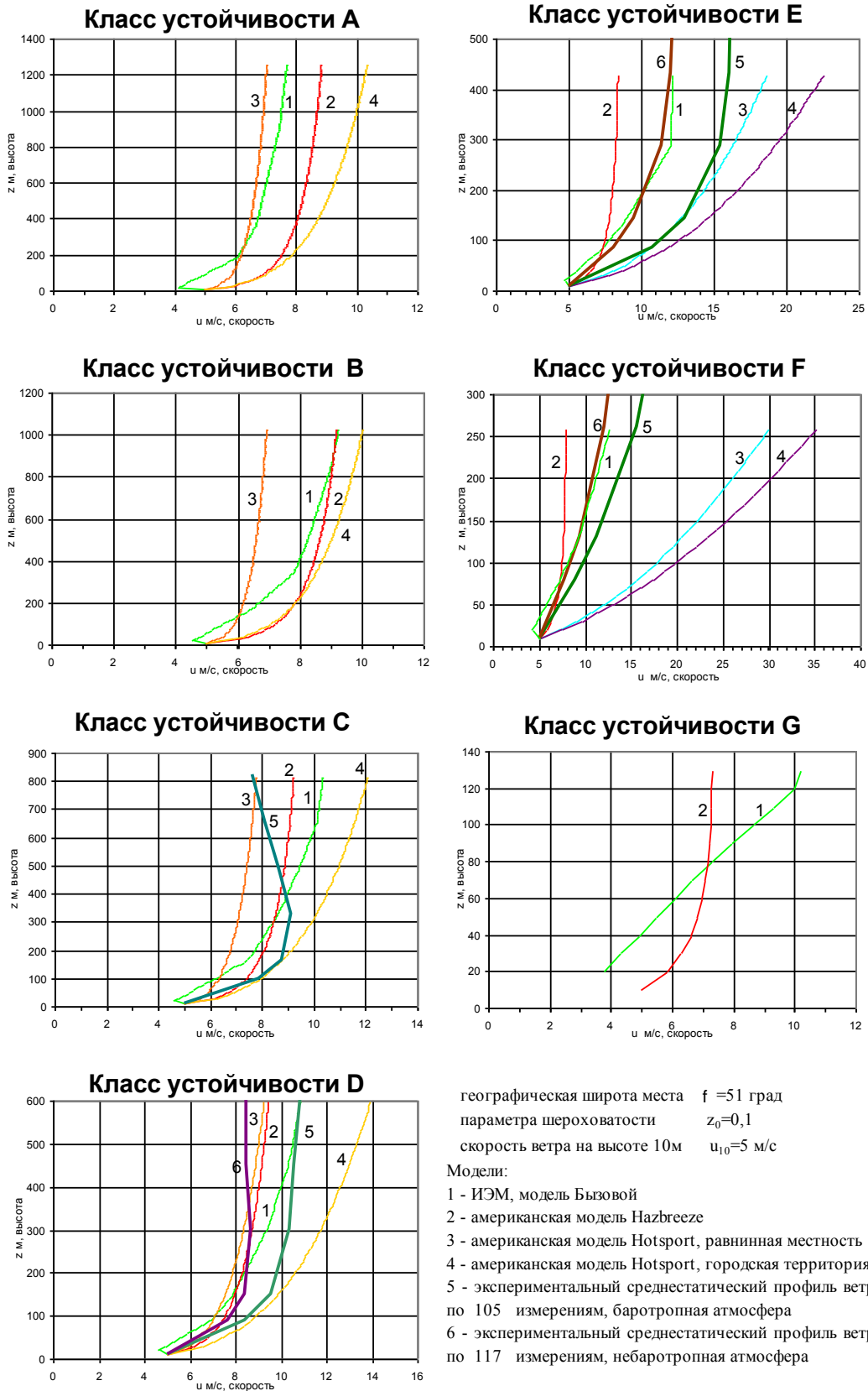
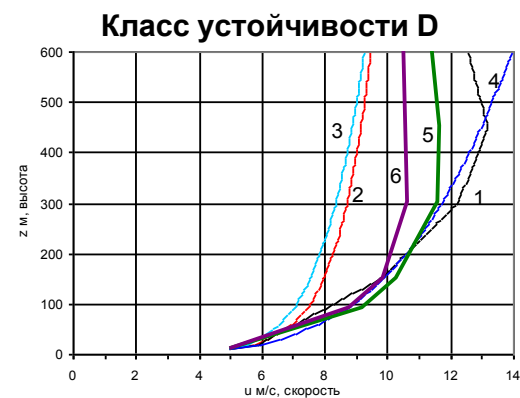
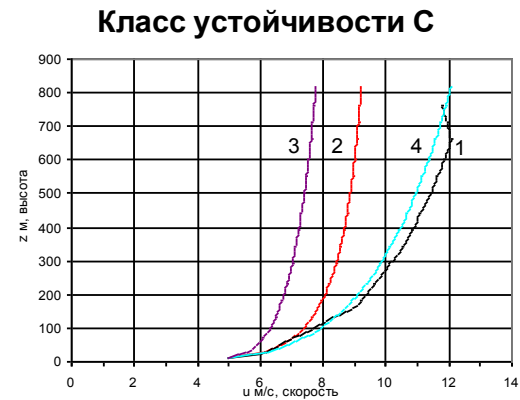
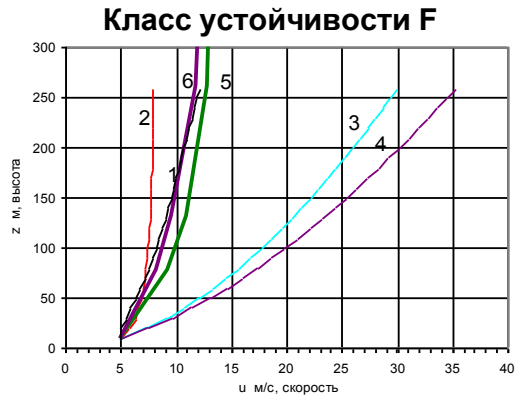
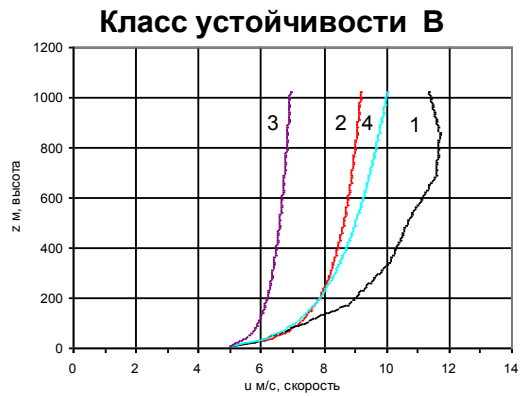
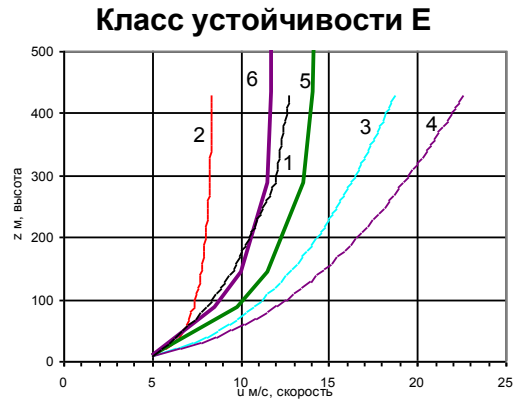
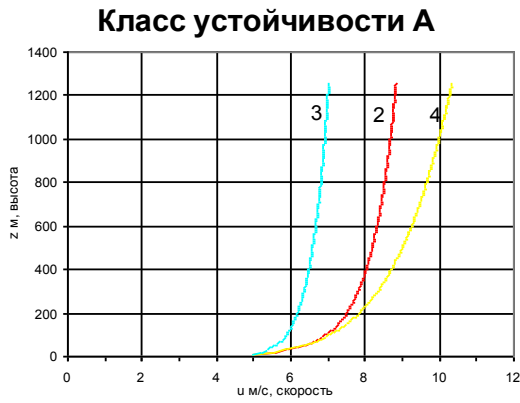


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные вертикальные профили ветра для холодного времени года для различных классов устойчивости атмосферы



географическая широта места  $f = 51$  град  
 параметра шероховатости  $z_0 = 0,1$   
 скорость ветра на высоте 10м  $u_{10} = 5$  м/с

Модели:

- 1 - ИЭМ, модель Бызовой
- 2 - американская модель Hazbreeze
- 3 - американская модель Hotsport, равнинная местность
- 4 - американская модель Hotsport, городская территория
- 5 - экспериментальный среднестатистический профиль ветра по 92 измерениям, баротропная атмосфера
- 6 - экспериментальный среднестатистический профиль ветра по 86 измерениям, небаротропная атмосфера

Рис. 4. Расчетные и экспериментальные вертикальные профили ветра для теплого времени года для различных классов устойчивости атмосферы

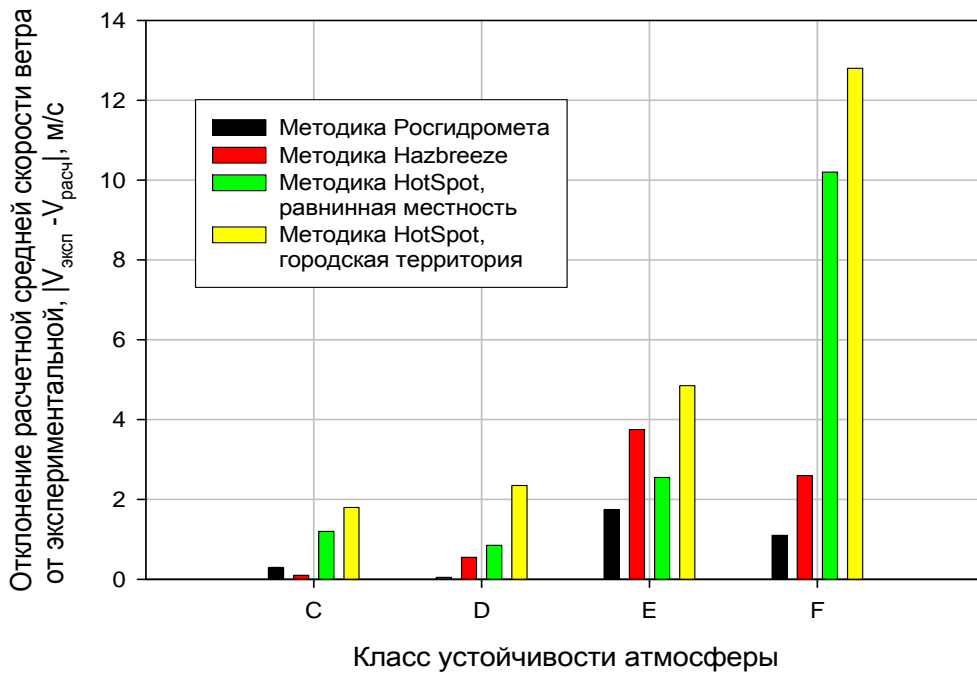


Рис. 5. Отклонение расчетной средней скорости ветра, полученной по разным методикам, от экспериментальной для различных классов устойчивости атмосферы для теплого сезона

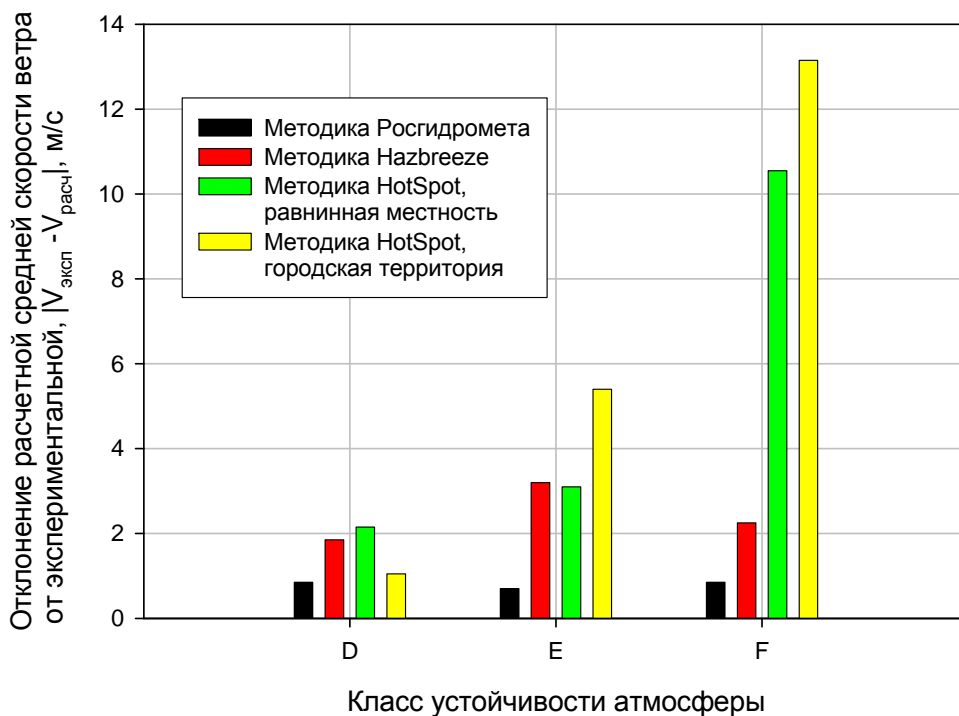


Рис. 6. Отклонение расчетной средней скорости, полученной по разным методикам, от экспериментальной для различных классов устойчивости атмосферы для холодного сезона года

## Заключение

В работе приведен обзор и проведено сравнение с экспериментом методик расчета вертикального профиля скорости ветра в пограничном атмосферном слое российской методики Росгидромета и 2-х американских – HotSpot и HazBreeze. Указания или данные что та или иная методика является более предпочтительной по сравнению с другой отсутствовали. Рассмотренные методики характеризуются разным уровнем сложности расчетов и насыщенностью формулами. Сравнение показало, что, практически, для всех категорий устойчивости атмосферы и параметре шероховатости 0,1 м, при которых проводились измерения, российская методика дает лучшее совпадение с экспериментом. Поэтому именно ее следует рекомендовать для расчетов РЗМ.

## Список литературы

1. Н. Л. Бызова, В. А. Шнайдман, В. Н. Бондаренко. Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы по наземным данным. Метеорология и гидрология, № 11, 1987.
2. Атмосфера. Справочник.
3. Инструкция по специальным гидрологическим и метеорологическим исследованиям и расчетам. М: Государственный комитет по использованию атомной энергии СССР, 1974 г.
4. Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. Справочник. Радиоактивные выбросы в биосфере. М. Энергоатомиздат. 1986 г.
5. Методические указания. «Оценка последствий гипотетических аварий при сбор-

ке и разборке ядерных боеприпасов на серийных предприятиях Минатома России, МУ 2.6.1. 023-2000, 2000 г.

6. Approved methods and guidance for the modeling and assessment of air pollutants in NSW, <http://www.epa.nsw.gov.au/air/amgmaap-06.htm>

7. Handbook of Applied Meteorology, "A Wiley-Interscience publication", David D. 1985 г.

8. Donald L. Ermak. User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air Releases. UCRL-MA-105607, June 1990.

9. Paulson C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer, (1970) J. Appl. Met., 9, 857-861.

10. Businger J. A. Turbulent transfer in the atmospheric surface layer. In: Workshop on micrometeorology, D. A. Haugen, Ed., Amer. Meteor. Soc. Boston, Mass. (1973), 67-98.

11. М. И. Авраменко, М. Ю. Гвоздик, С. М. Ульянов. Результаты обработки информации метеопоста., Отчет ВНИИТФ, ПС96.6343-3, 1996 г.