

УДК 620.91, 620.92, 620.93

Б.Г.Тучинский, канд.экон.наук (Ин-т возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

## Средние скорости ветра в ветроэнергетике

*В статье рассмотрена правомерность применения в ветроэнергетических расчетах широко распространенного на данный момент показателя средней арифметической скорости ветра. Доказана нецелесообразность применения данного показателя в качестве оценок ветрового энергетического потенциала.*

*Предложены альтернативные показатели средних скоростей ветра, лишенные недостатков средней арифметической скорости ветра.*

*В статті розглянуто правомірність застосування у вітроенергетичних розрахунках широко розповсюдженого на даний момент показника середньої арифметичної швидкості вітру. Доведено недоцільність застосування даного показника в якості оцінок вітрового енергетичного потенціалу.*

*Запропоновано альтернативні показники середніх швидкостей вітру, позбавлені недоліків середньої арифметичної швидкості вітру.*

Средние величины – один из атрибутов практически любых количественных исследований. Особенно часто их применяют в исследованиях недетерминированных процессов. Естественно, что любые исследования ветровых режимов не обходятся без использования этого простого и наглядного инструментария. Наиболее популярным в данном отношении является показатель средней скорости ветра [1, 2]. Особенности применения этого показателя в ветроэнергетике посвящена данная статья.

Средняя скорость ветра "пришла" в ветроэнергетику из метеорологии, где этот показатель используют для целей, не связанных с энергетикой. В метеорологии средняя скорость ветра за период (обычно это – час, сутки, месяц или год) вводится формально, как средняя арифметическая<sup>1</sup> скоростей ветра, зарегистрированных за этот период:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \quad (1)$$

где  $n$  – количество измерений скорости ветра за период;  $v_i$  – результат  $i$ -го измерения;

<sup>1</sup> В метеорологии отсутствует указание на использование именно арифметической средней – это подразумевается по умолчанию. В то же время существует множество других видов средних величин [3]. Использование той или иной из них должно обосновываться спецификой поставленной задачи.

$\bar{v}$  – средняя за период скорость ветра.

Популярность данного показателя объясняется, во-первых, определённой метеорологической традицией и, во-вторых, легкостью его вычисления (даже без использования компьютера) по формуле (1). Для этого даже не требуется знание значений энергетических параметров ветровой электроустановки (ВЭУ).

Для уяснения особенностей данного показателя, рассчитанного по формуле (1), рассмотрим его равновесное свойство. Эта средняя величина обеспечивает уравнивание суммы измеренных скоростей ветра при замене их средней скоростью, т.е. имеют место равенства:

$$\sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^n \bar{v} = n\bar{v}. \quad (2)$$

Ясно, что ни формальное (1), ни равновесное (2) определение средней скорости ветра не дает возможности получить энергетическую интерпретацию данного показателя, которая служила бы обоснованием целесообразности применения в данном случае именно средней арифметической величины.

С точки зрения ветроэнергетики, более информативным, чем скорость ветра, показателем ветропотенциала площадки является удельная мощность ветрового потока (УМВП) [4], вычисляемая для  $i$ -го измерения по формуле (при постоянной плотности воздуха  $\rho$ ):

$$\Pi_i = \frac{1}{2} \rho v_i^3. \quad (3)$$

Оценим возможность использования средней арифметической скорости ветра (1) для оценки средней УМВП. Для простоты рассмотрим частный случай, когда

$$\sum_{i=1}^n (\bar{v} - v_i)^3 = 0. \quad (4)$$

Раскрывая скобки и приводя подобные члены, получаем:

$$-2\bar{v}^3 + 3\bar{v}\alpha_2 - \alpha_3 = 0, \quad (5)$$

откуда

$$\alpha_3 = -2\bar{v}^3 + 3\bar{v}\alpha_2, \quad (6)$$

где  $\alpha_k \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k, k = 2, 3$ .

Таким образом, чтобы найти среднее арифметическое кубов скоростей ветра  $\alpha_3$  при условии (4), достаточно вычислить средние арифметические их первых степеней  $\bar{v}$  и квадратов  $\alpha_2$ , а затем воспользоваться формулой (6).

Обозначим через  $s$  среднеквадратичное отклонение скоростей от средней арифметической скорости ветра. Тогда:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{v} - v_i)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{v}^2 - 2\bar{v}v_i + v_i^2) = -\bar{v}^2 + \alpha_2, \quad (7)$$

откуда:

$$\alpha_2 = \bar{v}^2 + s^2. \quad (8)$$

Подставив (8) в (6), получим:

$$\alpha_3 = -2\bar{v}^3 + 3\bar{v}(\bar{v}^2 + s^2) = \bar{v}^3 + 3\bar{v}s^2 \geq \bar{v}^3. \quad (9)$$

Равенство в (9) имеет место лишь при условии, если  $\forall i = 1, \dots, n v_i = const$ . В противном случае, как следует из (9), среднее арифметическое значение кубов скоростей ветра превышает куб средней арифметической скорости ветра, т.е. средняя арифметическая скорость ветра непригодна для оценки средней УМВП.

Для оценивания ошибки замены средней арифметической кубов скоростей ветра на куб средней арифметической скорости введем коэф-

фициент вариации  $k$ , равный по определению отношению среднеквадратичного отклонения к средней арифметической скорости ветра. Из этого определения следует, что  $s = k\bar{v}$ . Тогда вместо (9) имеем:

$$\alpha_3 = \bar{v}^3 + 3\bar{v}k^2\bar{v}^2 = \bar{v}^3(1 + 3k^2). \quad (10)$$

Относительная ошибка указанной замены составляет:

$$e = \frac{\bar{v}^3 + 3\bar{v}^3k^2 - \bar{v}^3}{\bar{v}^3 + 3\bar{v}^3k^2} = \frac{3k^2}{1 + 3k^2}. \quad (11)$$

В табл. 1 представлены результаты соответствующих численных расчетов для реальных коэффициентов вариации.

**Таблица 1. Относительные ошибки замены средней арифметической кубов скоростей ветра на куб средней арифметической скорости**

$k, \%$	$e, \%$
5	0,74
10	2,91
15	6,32
20	10,71
25	15,79
30	21,26

Из табл. 1 следует, что относительная ошибка использования средней арифметической скорости ветра при оценке УМВП является возрастающей функцией от разброса скоростей вокруг их средней величины (рис. 1).

Более подходящей для данного случая представляется средняя величина скорости ветра  $\bar{\bar{v}}$ , полученная из условия уравнивания средних УМВП, т.е.:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho v_i^3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho \bar{\bar{v}}^3, \quad (12)$$

откуда:

$$\bar{\bar{v}} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^3}{n}}. \quad (13)$$

Формула (13) определяет среднюю кубическую скорость ветра, взамен средней арифметической, определенной формулой (1).

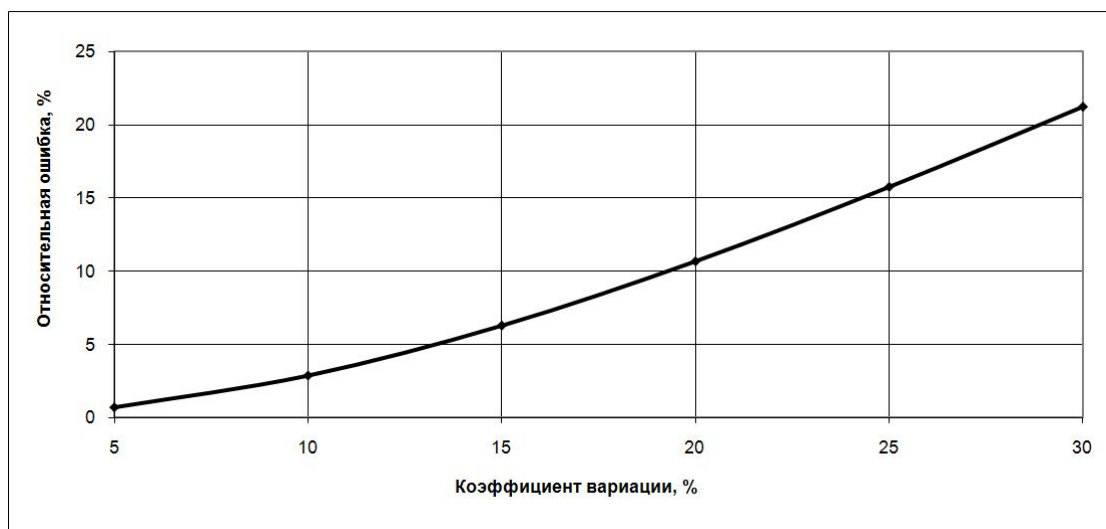


Рис. 1. Залежність відсоткової похибки (11) від коефіцієнта варіації швидкості вітру.

Переходя до можливості застосування показателя середньої швидкості вітру для порівняння вітропотенціалу площадок, відзначимо, що функція залежності виробленої потужності ВЕУ від швидкості вітру (характеристика потужності ВЕУ) є суттєво більш складною, ніж аналогічна функція для УМВП (5). Ця функція є розривною, може мати розрив похідної (для ВЕУ з активною системою управління потужністю), а ділянку набору потужності, як правило, складає з двох частин – випуклої та вогнутої.

Нашою подальшою задачею є дослідження можливості використання середніх швидкостей вітру для ранжування площадок за виробленою електроенергією ВЕУ. Т.к. аналітичне рішення даної задачі не представляє собою можливого, дослідимо її чисельно.

У цій роботі в розрахунках для конкретності використано характеристику потужності (рис. 2) сучасної моделі ВЕУ – Vestas V112-3MW [5].

Відповідні розрахунки, проведені в МНТЦ вітроенергетики НАН України [6], підтверджують непридатність для вітроенергетики показателя середньої арифметичної (за рік) швидкості вітру. Справа в тому, що при використанні даного показателя для ранжування площадок за виробленою електроенергією ВЕУ повинно задовольнятися вимога: функція залежності між середньою швидкістю вітру та виробленою електроенергією ВЕУ на площадці повинна бути монотонно зростаючою. Невиконання даної вимоги робить неможливою правильну інтерпретацію результатів оцінки вітропотенціалу площадки.

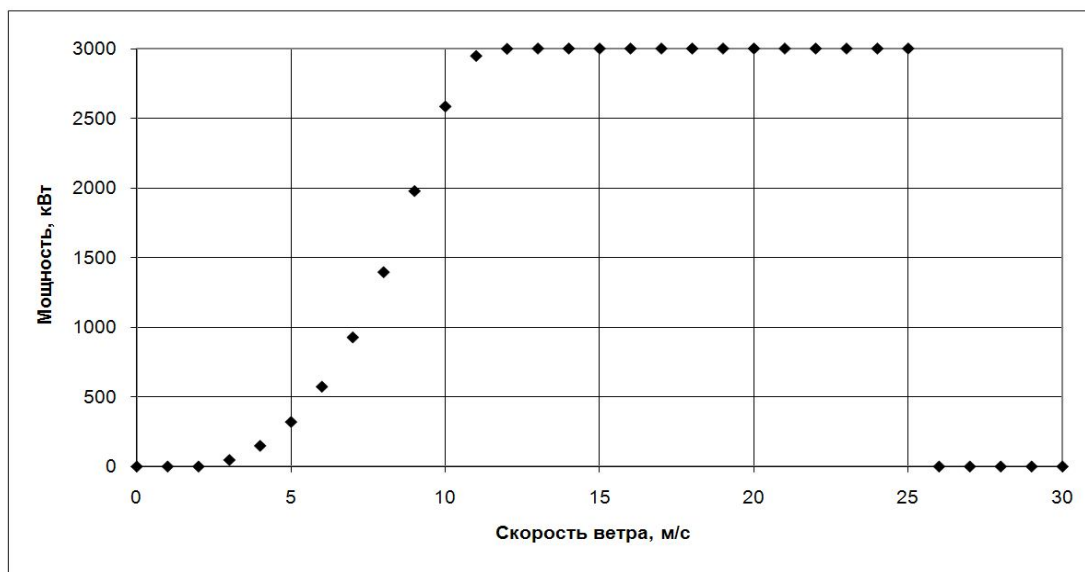


Рис. 2. Характеристика потужності ВЕУ Vestas V112-3MW.

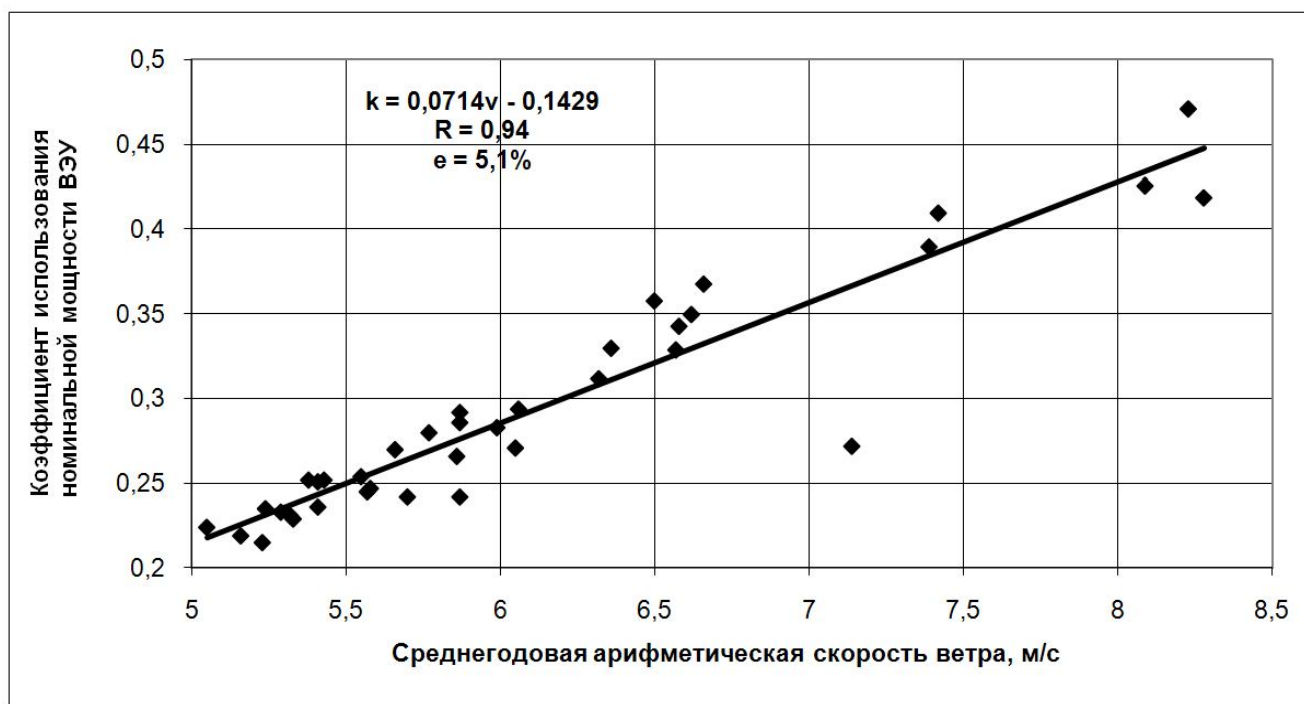


Рис. 3. Зависимость между средней скоростью ветра и КИНМ ВЭУ Vestas V112-3MW.

На рис. 3 представлены в графическом виде результаты расчётов среднегодовой (арифметической) скорости ветра и коэффициента использования номинальной мощности ВЭУ (КИНМ) модели Vestas V112-3MW на ряде площадок метеостанций Украины с повышенным ветропотенциалом. Среднегодовая скорость ветра рассчитывалась для высоты оси ротора ВЭУ 119 м, коэффициент вертикального профиля ветра во всех случаях принимал значение 0,14.

Как видно из приведенной диаграммы, даже при наличии высокой корреляции и низкой ошибки аппроксимации требование монотонности выполняется не всегда. Так, при одной и той же среднегодовой арифметической скорости ветра  $\approx 5,8$  м/с КИНМ колеблется от 0,24 до 0,29, т.е. различие значений показателя составляет  $\approx 20\%$ . Имеется немало площадок, на которых бóльшая выработка электроэнергии ВЭУ имеет место при меньшей среднегодовой арифметической скорости ветра. И, наконец, имеется площадка, для которой при среднегодовой арифметической скорости ветра 7,2 м/с КИНМ совпадает с соответствующим показателем при средних скоростях ветра 5,6-6,1 м/с.

Отсутствие монотонной зависимости между среднегодовой арифметической скоростью ветра и выработкой электроэнергии ВЭУ является следствием того, что на выработку электроэнергии ВЭУ

существенно влияет вид функции распределения скоростей ветра за время наблюдений, который, в свою очередь, зависит не только от средней скорости ветра, но и от моментов более высоких порядков (дисперсии, асимметрии, эксцесса).

В качестве "скоростной" оценки ветропотенциала площадки в [6] предлагается использовать показатель, названный средней энергетической скоростью ветра (СЭСВ).

Пусть по расчету за период времени продолжительностью  $T$  часов ВЭУ вырабатывает  $E$  кВт·ч электроэнергии. По аналогии с принятым в механике определением средней скорости движения тела, в качестве СЭСВ определим такую **постоянную** скорость ветра, при которой ВЭУ за то же время работы выработает такое же количество электроэнергии. Для формализации этого определения дополнительно введем обозначения:  $v$  – скорость ветра;  $\bar{v}_e$  – средняя энергетическая скорость ветра (СЭСВ);  $P(v)$  – функция характеристики мощности ВЭУ.

Исходя из определения, СЭСВ вычисляется как корень уравнения:

$$E = T \cdot P(\bar{v}_e), \quad (14)$$

где  $T$  – продолжительность периода.

Если измерения скорости ветра осуществляются через равные промежутки времени (а это

имеет место в подавляющем большинстве случаев), то уравнение (14) эквивалентно уравнению для средних мощностей, выработанных ВЭУ:

$$P(\bar{v}_e) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P(v_i). \quad (15)$$

Т.к. характеристика мощности – функция нелинейная, то (15) – нелинейное уравнение относительно  $\bar{v}_e$ . Для численного решения этого уравнения можно использовать любые известные вычислительные методы решения нелинейных уравнений, не требующие знания производных [7].

Определённая таким образом средняя энергетическая скорость ветра имеет ясный физический смысл и удовлетворяет требованию монотонности связи с показателем выработки электроэнергии ВЭУ. Ясно, что СЭСВ для каждой модели ВЭУ будет иметь свое значение. На первый взгляд, та-

кая множественность оценок средней скорости ветра для одной и той же площадки представляется неоправданной. На самом же деле это правильно отражает тот факт, что выработка электроэнергии ВЭУ испытывает комбинированное влияние двух "кривых" – функции распределения скоростей ветра на площадке и функции характеристики мощности ВЭУ.

На рис. 4 представлена диаграмма, аналогичная рис. 2, в которой абсциссой является не средняя арифметическая, а средняя энергетическая скорость ветра.

Как видно из рис. 4, сформулированное выше требование монотонности в данном случае соблюдается.

Соотношение между средней арифметической и средней энергетической скоростями ветра показано на рис. 5 (площадок для тех же метеостанций).

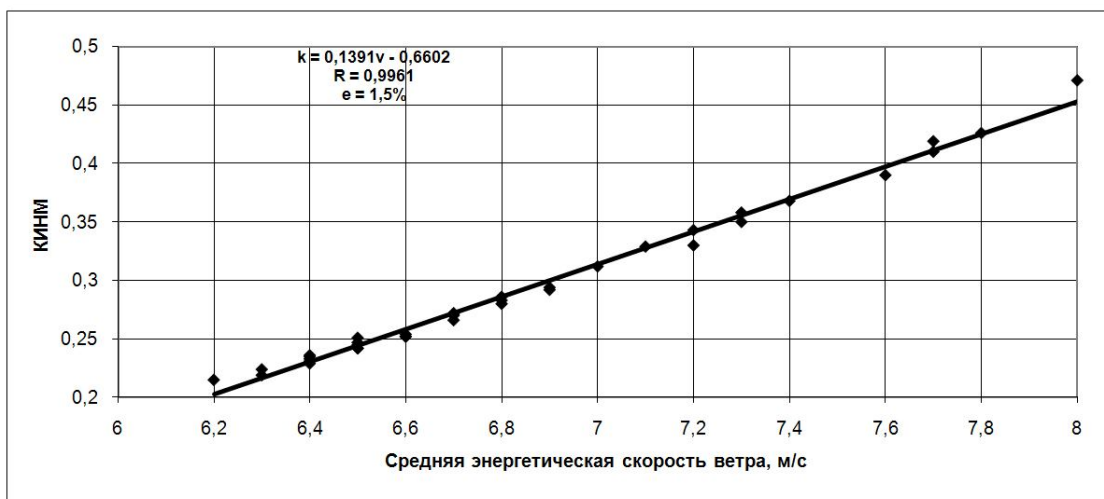


Рис. 4. Зависимость КИНМ ВЭУ Vestas V112-3MW от средней энергетической скорости ветра.

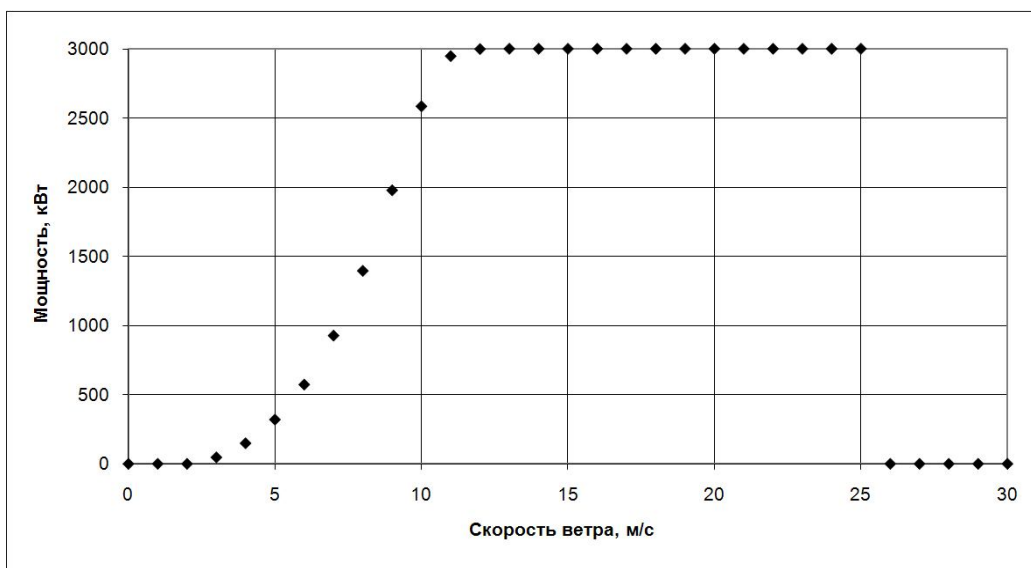


Рис. 5. Диаграмма рассеяния зависимости между средней арифметической и средней энергетической скоростью ветра.

Прямая линия на рис. 5 является линией равных значений двух показателей.

Из анализа рис. 5 следует, что, как правило, средняя энергетическая скорость ветра превышает среднюю арифметическую. Однако возможно и обратное – в нашей выборке имеется четыре таких случая. Это лишний раз подтверждает неправомочность использования средней арифметической скорости ветра для оценки ветрового энергетического потенциала площадки.

**Выводы.** 1. Средняя арифметическая скорость ветра непригодна для оценки ветрового энергетического потенциала площадки, в том числе, для ранжирования площадок по критерию уровня ветропотенциала.

2. Для оценивания средней удельной мощности ветрового потока целесообразно использовать среднюю кубическую зарегистрированных скоростей ветра.

3. Предложенный показатель средней энергетической скорости ветра, в отличие от средней

арифметической скорости ветра, основан на принятой в физических науках методологии определения средних величин, имеет ясную энергетическую интерпретацию и вполне может использоваться для ранжирования площадок по критерию ветропотенциала.

1. [http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/atlas\\_index.html](http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/atlas_index.html)
2. Cristina L. Archer and Mark Z. Jacobson. Evaluation of global wind power // Journal of geophysical research, vol. 110, d12110, doi:10.1029/2004JD005462, 2005. – 20 p.
3. Джини К. Средние величины. – М.: Статистика, 1970. – 448 с.
4. Wind Energy Resource Atlas of the United States. – Golden, Colorado 80401, Pacific Northwest Laboratory, 1991. – 210 p.
5. [http://v112.vestas.com/Vestas\\_V\\_112\\_web.pdf](http://v112.vestas.com/Vestas_V_112_web.pdf).
6. Тучинский Б.Г. О показателях средней скорости ветра. – IV Международная конференция "Нетрадиционная энергетика в XXI веке" Крым, Ялта (Гурзуф, 29 сентября–3 октября 2003 г.). – С. 147–149.
7. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1966. – С. 112–199.

# КРИМ БУДІНДУСТРІЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

МІЖРЕГІОНАЛЬНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА

- Сучасні будівельні матеріали і технології
- Фарби, лаки
- Будівельні машини і механізми
- Вікна і двері
- Сантехніка
- Екологія, системи очищення води
- Ландшафтна і садово-паркова архітектура
- Системи опалення, вентиляції і кондиціонування
- Енергозбереження та використання нетрадиційних екологічно чистих джерел енергії
- Електротехнічне і освітлювальне обладнання
- Програмне забезпечення підприємств будівельної, енергетичної і електротехнічної галузей промисловості

## 2012

### Осінь

### 25–27 жовтня

м. Сімферополь  
вул. Київська, 115  
СК «Дружба»



ФОРУМ

КРИМСЬКІЕ  
ВИСТАВКИ

З питань участі у виставці звертайтеся в оргкомітет:  
95011, Україна, м. Сімферополь, вул. Самокіша, 18, оф. 406  
(0652) 56-06-67, 56-06-47, 54-60-66, 54-67-46  
E-mail: [expoforum@expoforum.crimea.ua](mailto:expoforum@expoforum.crimea.ua), [expo@expoforum.crimea.ua](mailto:expo@expoforum.crimea.ua)  
[www.expoforum.crimea.com](http://www.expoforum.crimea.com)