



ДОКЛАД

по диссертационной работе на соискание ученой степени
доктора технических наук

«МЕТОДОЛОГИЯ РЕСУРСНОГО И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО
ОБОСНОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК»

НИКОЛАЕВ Владимир Геннадьевич, к. ф.-м. н.

директор научно-информационного Центра «АТМОГРАФ»,
Москва, Россия

Тел./факс: 8-499-744-41-63, E-mail: atmograph@gmail.com

Слайд 1

Моделирование мощности ВЭС $P_{\text{ВЭС}}$ в заданном месте / районе территории России и стран СНГ по методике НИЦ “АТМОГРАФ”

$$P_{\text{ВЭС}} = K_{\text{ТГ}}(n) \cdot K(V)_{\text{нид}} \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \int_{S_{\text{ВК}}} \int_{V_0}^{V_{\text{БУР}}} p(V) \cdot f(V) \, dV = K_{\text{ТГ}}(n) \cdot K(V)_{\text{нид}} \cdot \sum_{i=1}^N p(V_i) \cdot G(V_i)$$

где $K_{\text{ТГ}}(n)$, модель коэффициента технической готовности ВЭС (переменного по годам, n – номер года работы ВЭУ), $K_{\text{ТГ}}(n)$ – **функция** технических простоев

$K(V)_{\text{нид}}$ – коэффициент неидеальности работы ВЭС, $K(V)_{\text{нид}}$ – **функция** характеристик ветра и технических параметров ВЭУ

(ρ/ρ_0) – параметр плотности (отношение реальной плотности к стандартной)

$p(V)$ – мощностная характеристика ВЭУ, $p(V)$ – нелинейная функция скорости ветра и технических параметров ВЭУ

$G(V)$ – табулированная функция плотности вероятности распределения скорости ветра по ее градациям на высоте оси ветроколеса ВЭУ $H_{\text{ВК}}$.

$f(V)$ – функция плотности вероятности распределения скорости ветра – аналитическая функция аппроксимирующая $\omega(V)$ на высоте оси ВК

Слайд 2

Глава 2. Методика моделирования вероятности технических простоев $P_{\text{ТП}}(n)$ и технической надежности ВЭС $K_{\text{ТГ}}(n)$

Согласно анализу эксплуатационных показателей ВЭУ Av_6 , Av_{10} и сроков капремонта, ВЭУ – “стареющие” технические объекты с растущей с годами $P_{\text{ТП}}$. Модели $P_{\text{ТП}}$ “стареющих” ВЭУ построены автором на базе растущих со временем с ускорением функций (степенных вида $P_{\text{ТП}}(n)=a \cdot n^b$ (2.7) либо экспоненциальных вида $P_{\text{ТП}}(n)=\lambda \cdot \exp(\omega \cdot n)$ (2.8). Дополнительные ограничения на функции (2.7) и (2.8) вытекают из условия $P_{\text{ТП}} < 1$ на протяжении всего ресурса ВЭУ: $F(n) < F(20) \leq 1$ (2.9) и из данных о $P_{\text{ТП}}$ из-за регламентных работ: $P_{\text{ТП}}(n) \geq 0,005$ (2.10). Анализ проведен в предположении о линейной связи $P_{\text{ТП}}$ на 1-м году работы и P_{10} (средней $P_{\text{ТП}}$ за первые 10 лет) со значением $P(6)$ на 6-м году: $P_{\text{ТП}}(1)=m \cdot P_{\text{ТП}}(6)=m \cdot (1-Av_6)$ (2.11) и $P_{\text{ТП.10}}=k \cdot P_{\text{ТП}}(6)=m \cdot (1-Av_6)=0,1 \cdot \int P_{\text{ТП}}(n) \cdot dn$ (2.12), приводящих с учетом (2.7) и (2.8) к характеристическим трансцендентным ур-ям: $10^{b+1}-2^{b+1}+6^b \cdot (b+1) \cdot (m-10 \cdot k)=0$ (2.13) и $e^{10 \cdot \omega}-e^{2 \cdot \omega}+\omega \cdot e^{6 \cdot \omega} \cdot (m-10 \cdot k)=0$ (2.14) относительно неизвестных b, k, m и ω, k, m . Из численного анализа ур-ний (2.13) и (2.14) =>удовлетворить условиям (2.9)–(2.12) можно лишь в классе экспоненциальн. функций (2.8) в диапазонах ω, k, m, λ , данных в табл.2.1

Таблица 2.1. Параметры модели вероятности технических простоев ВЭУ.

| | ω | | λ | | k | | m | | Av_{10} | |
|---------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|----------------|----------------|
| | ω_{\min} | ω_{\max} | λ_{\min} | λ_{\max} | k_{\min} | k_{\max} | m_{\min} | m_{\max} | $Av_{10 \min}$ | $Av_{10 \max}$ |
| $Av_6 = 0,94$ | 0,159 | 0,195 | 0,01862 | 0,02311 | 1,038 | 1,066 | 1,826 | 1,827 | 0,930 | 0,936 |
| $Av_6 = 0,96$ | 0,213 | 0,229 | 0,01012 | 0,01114 | 1,084 | 1,100 | 1,831 | 1,832 | 0,953 | 0,956 |
| $Av_6 = 0,98$ | 0,233 | 0,273 | 0,00389 | 0,00494 | 1,105 | 1,152 | 1,839 | 1,840 | 0,974 | 0,977 |

Прогноз технических и энергетических показателей ВЭС

$K_{ТГ}$ – функция технической готовности ВЭУ (availability) (определяется техническим совершенством ВЭУ и ремонтной базой – **слабое место России !**)

Разработанная модель техн. готовности определяет многолетний ход $K_{ТГ}$:

$K_{ТГ} = 0,96 - 0,98$ на 6-ой год \square $0,85 - 0,90$ на 20-ый год \square **средний $K_{ТГ} \approx 0,95 - 0,92$**

Диапазон возможных значений вероятности технических простоев ВЭУ

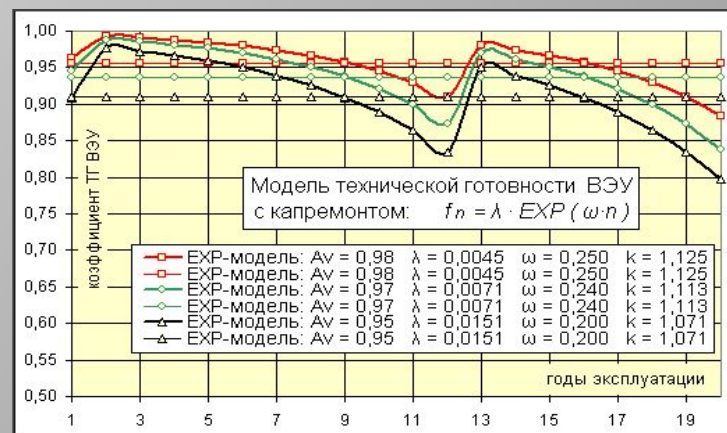
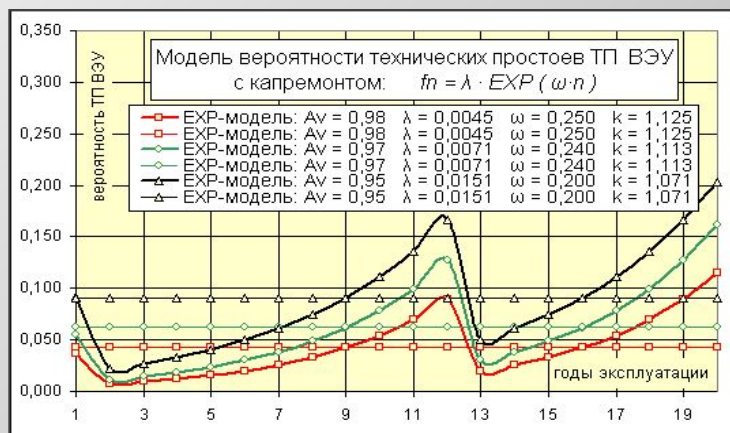


Таблица 2.2. Параметры моделей технической готовности ВЭУ с капремонтом

| Технические простои ВЭУ | ω_{CP} | λ_{CP} | k_{CP} | m_{CP} | Av_{CP1} | Av_{CP10} | Av_{CP12} | Av_{CP20} | Av_{CP1-20} |
|-------------------------|-------------------|----------------|----------|----------|--|-------------|-------------|-------------|---------------|
| | при $Av_6 = 0,95$ | $0,01063$ | $1,092$ | $1,832$ | Диапазон $K_{ТГ}$ ВЭУ при $Av_3 = 0,95, 0,97$ и $0,98$ | | | | |
| $Av_6 = 0,96$ | 0,221 | 0,01063 | 1,092 | 1,832 | 0,927 | 0,955 | 0,849 | 0,115 | 0,922 |
| $Av_6 = 0,98$ | 0,253 | 0,00441 | 1,129 | 1,840 | 0,963 | 0,976 | 0,912 | 0,358 | 0,956 |

Таблица 2.4. Многолетний ход среднегодовых Эз на ВЭУ разных поколений (в % от Кз).

| Тип ВЭУ \ Годы эксплуатации : | 1 – 2 | 3 – 5 | 6 – 10 | 11 – 15 | 16 – 20 |
|-------------------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| ВЭУ 150 кВт в ЕС | 1,2 | 2,8 | 3,3 | 6,1 | 7,0 |
| ВЭУ 300 кВт в ЕС | 1,0 | 2,2 | 2,6 | 4,0 | 6,0 |
| ВЭУ 600 кВт в ЕС | 1,0 | 1,9 | 2,2 | 3,5 | 4,5 |
| ВЭУ 600 кВт в ЕС | | 1,88 – 1,92 | 2,11 – 2,26 | 4,21 – 4,73 | 4,42 – 5,09 |

энергетических показателей ВЭС

Располагаемая мощность ВЭУ : $P_{ВЭУ} = K_{ВК}^{S_{ВК} V_{MAX}} \cdot K_{РЕМ} \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \int_{V_0}^N \int p(V) \cdot f(V) dV = K_{НИД} \cdot K_{ТГ} \cdot \sum p(V_i) \cdot f(V_i)$

$K_{НИД}$ – функция $V(H)$ и $V(\varphi)$, затенения, плотности, инерционности системы ориентации, потребления электроэнергии самой ВЭС и потерь в ее сетях

Исследование влияния на $P_{ВЭУ}$ высотного сдвига направления ветра $\varphi(h)$ в ПСА с использованием модели $\varphi(h) = \varphi_0 \cdot \{ \exp[-(h/h_{ВК} - 1)] - 1 \} / (\exp(1) - 1)$ (2.2).

Таблица 2.7. Зависимость изменений мощности ВЭУ от высотных сдвигов направления ветра

| $\varphi_0, ^\circ$ | Диаметр ветроколеса 60 м | | | | Диаметр ветроколеса 80 м | | | | | Диаметр ветроколеса 100 м | | | | |
|---------------------|---------------------------|-------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Высота оси ветроколеса, м | | | | Высота оси ветроколеса, м | | | | | Высота оси ветроколеса, м | | | | |
| | 40 | 50 | 60 | 70 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
| 0 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 20 | 0,987 | 0,993 | 0,995 | 0,997 | 0,991 | 0,994 | 0,995 | 0,996 | 0,997 | 0,990 | 0,993 | 0,994 | 0,995 | 0,996 |
| 40 | 0,952 | 0,971 | 0,981 | 0,986 | 0,965 | 0,975 | 0,982 | 0,986 | 0,989 | 0,961 | 0,971 | 0,977 | 0,982 | 0,985 |
| 60 | 0,900 | 0,938 | 0,958 | 0,970 | 0,926 | 0,946 | 0,960 | 0,969 | 0,975 | 0,916 | 0,937 | 0,951 | 0,961 | 0,968 |

Таблица 2.8. Относительное уменьшение мощности ВЭС от расстояния между ВЭУ

| Число диаметров ВК n : | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{ВЭУ} / P_0^{ВЭУ}$: | 0,595 | 0,782 | 0,851 | 0,893 | 0,922 | 0,938 | 0,949 | 0,958 | 0,966 | 0,972 |

Определение энергетически эффективных ВЭУ

Располагаемая мощность ВЭУ :
$$P_{ВЭУ} = \frac{S_{ВК} V_{MAX}}{V_0} K_{НИД} \cdot K_{РЕМ} \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \int_{V_1}^N \int p(V) \cdot f(V) dV = K_{НИД} \cdot K_{ТГ} \cdot \sum p(V_i) \cdot f(V_i)$$

$p(V)$ – рабочая характеристика ВЭУ (рис.2) – функция аэродинамической эффективности (коэффициента использования удельной мощности ветра – ζ или Cp-фактора $\zeta = 0,47-0,5$ для современных ВЭУ (рис.1).

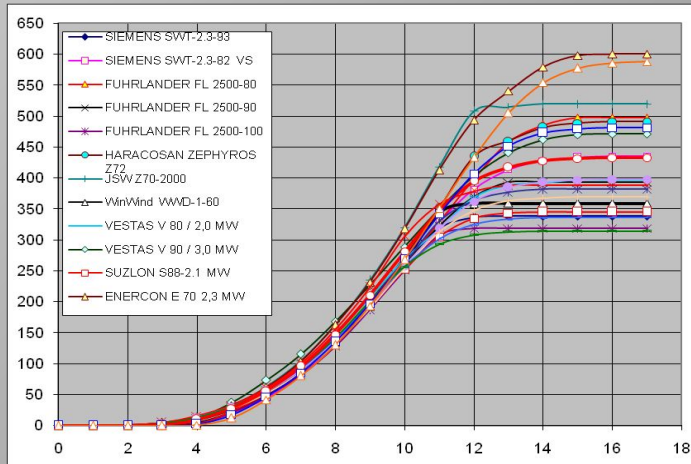
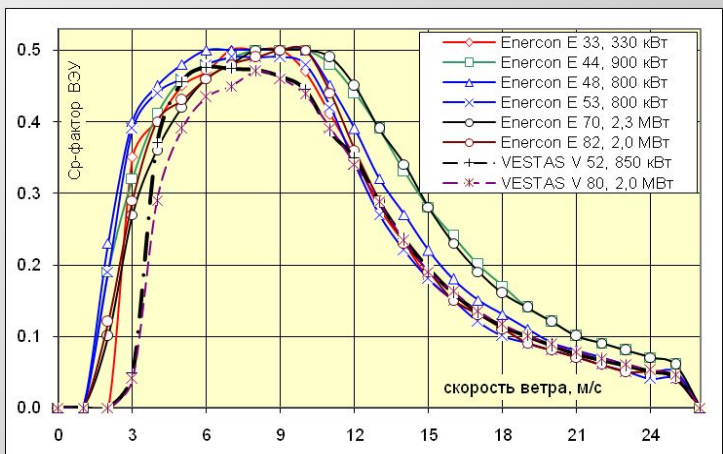
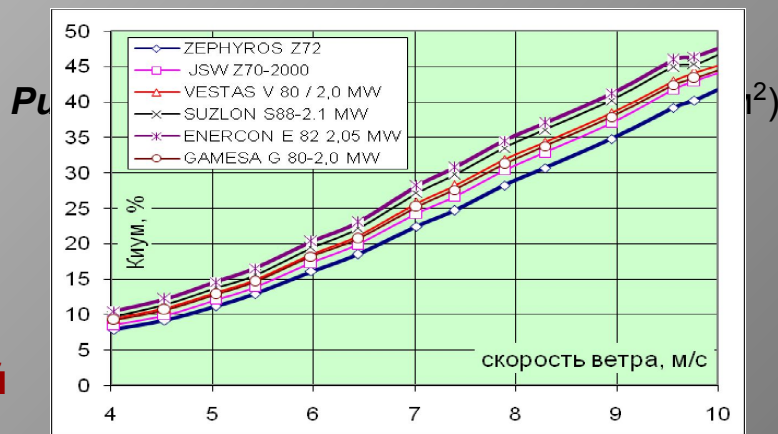


Рис. 1. Cp-фактор современных ВЭУ

Оптимизация выбора энергетически и экономически эффективных ВЭУ для данных ветровых условий в методике автора достигается численным сравнительным анализом по параметру $K_{ИУМ}$ всех возможных базовых ВЭУ с использованием компьютерной БД “Эргомаш”, содержащей рабочие и технические характеристики большинства известных серийно производимых ВЭУ (рис.3)



Слайд 7

Глава 2. Основные результаты и выводы моделирования технических и энергетических показателей ВЭС :

- ▶ **Моделированием** вероятности и длительности среднегодовых технических простоев и технической готовности ВЭС последних поколений мегаваттной мощности **установлено существенное (на 10–15%) уменьшение годовой выработки ВЭС из-за ремонтных простоев по мере выработки их ресурса**, выявлены факторы “старения” ВЭУ и обоснована необходимость его учета для достоверного прогноза технико-экономических показателей ВЭС и их экономического ресурса.
- ▶ **Моделированием выявленных факторов неидеальности работы ВЭС установлено, что их совокупный учет может приводить к снижению теоретически возможной мощности ВЭС на 15–20% и поэтому необходим при технико-экономическом обосновании проектов ВЭС.**

Глава 3 “Разработка и применение методик достоверного определения ВЭП и мощности ВЭС на территории РФ”

Мощность ВЭУ:
$$P_{\text{ВЭУ}} = K_{\text{Нид}} \cdot K_{\text{ТГ}}(n) \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \int_{V_0}^{S_{\text{ВК}}} \int_{V_0}^{V_{\text{БУР}}} p(V) \cdot f(V) dV = K_{\text{Нид}_1} \cdot K_{\text{ТГ}}(n) \cdot (\rho/\rho_0) \cdot \sum p(V_i) \cdot f(V_i)$$

$p(V)$ – рабочая, или мощностная характеристика ВЭУ, определяется расчетным путем или экспериментально (в сертификационных испытаниях) – нелинейная характеристика

$f(V_i)$ – повторяемость скоростей ветра по градациям или $f(V)$ – аппроксимирующая аналитическая функция – плотность вероятности распределения ветра по скоростям на высоте оси ВК, **дающая погрешность определения ВЭП и $P_{\text{ВЭУ}}$ до 100% и более** (в зависимости от эффективности методики)

Традиционно **основной источник повторяемостей скоростей ветра по градациям $f(V_i)$ – данные многолетних метеорологические измерения на высоте 8 – 16 м и краткосрочной (1-2 года) ветровой разведки на метеомачтах**

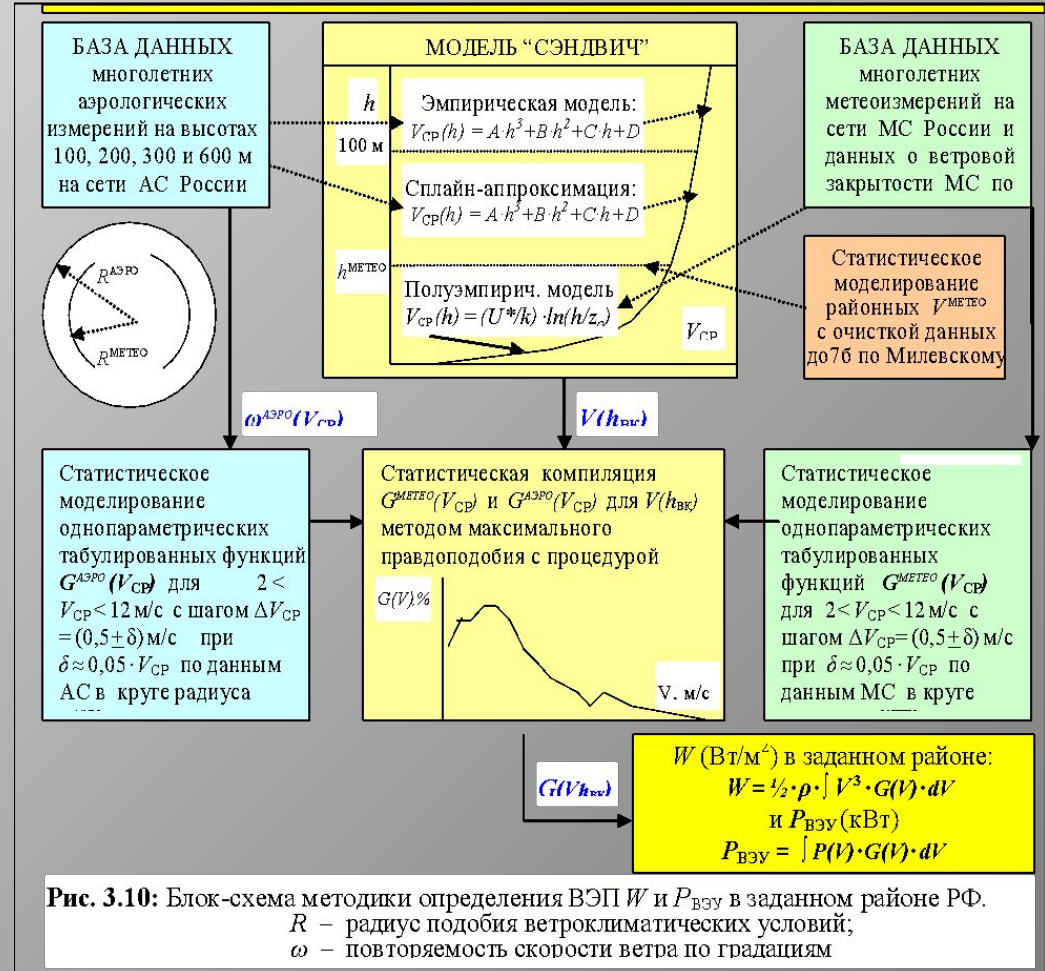
Аппроксимирующих аналитических функций $f(V)$ – известно свыше десятка, наиболее распространена за рубежом – **двухпараметрическая функция Вейбулла** (менее распространена функция Рэля-Максвелла)

Классическое аналитическое определение $f(V)$ на высоте оси ветроколеса $H_{\text{ВК}}$ производится подъемом границ градаций при сохранении повторяемости внутри самих градаций $f(V_i)$, определенной по данным метеорологических измерений (8 – 16 м) с помощью более или менее точно установленных моделей нарастания скорости ветра с высотой $V(h)$

Аналитическая методика достоверного определения ВЭП и мощности ВЭС на территории России и стран СНГ

Кардинальное повышение достоверности методики моделирования ВЭП и $P_{ВЭУ}$ в России (с погрешностью $\leq 10-14\%$ для равнин и $\leq 18-25\%$ – для сложного рельефа) обеспечивается новыми методическими подходами (рис. 3.1)

- $P_{ВЭУ}$ определяется по статистически установленной ее линейной связи со средними сезонными скоростями ветра
- Вместо экстраполяции скоростей ветра с высот $h^{метео}$ (8–16 м) на $H_{ВК}$ ВЭУ (до 200 м) используется более точная интерполяция по данным МС и АС, зависящая от точности моделей $V(h^{метео})$ и $V(100-600 \text{ м})$.
- Характеристики ветра на $h^{метео}$ и $h^{аэро}$ вместо данных одной ближайшей МС и АС статистически моделируются по “очищенным” данным всех (до 50) МС района в радиусе до 250 км и всех (до 10) АС в радиусе до 600 км от искомой точки.
- Функции $G(V)$ вместо данных ветровой разведки и ближайшей МС (в зарубежных методиках) определяются по данным всех МС и АС района в радиусе до 500–600 км от ВЭС.

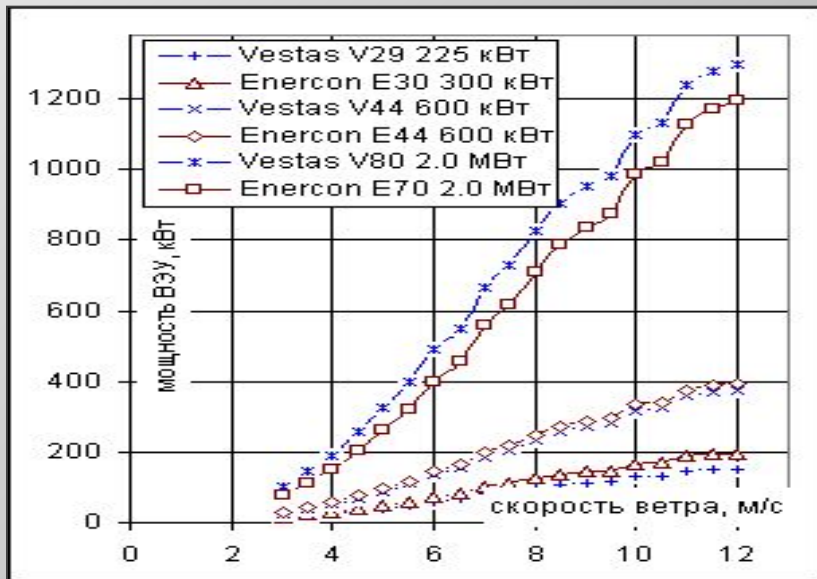


Слайд 10

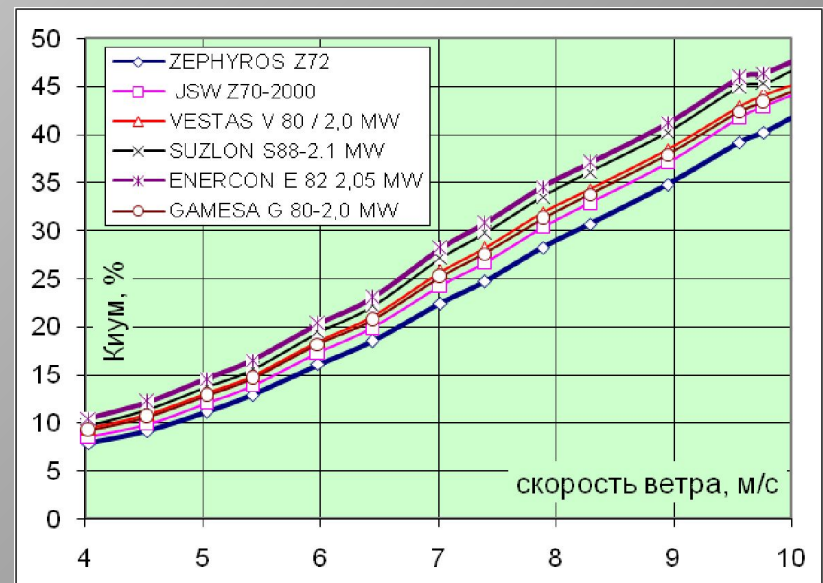
Принципиальная новизна, обеспечивающая эффективность современных методик определения ВЭП и ВЭУ

- Использование статистически установленных и обоснованных корреляционных связей (примерно линейных) между скоростями ветра и мощностями ВЭУ, отличающихся для регионов и сезонов и ВЭУ разных типов и мощностей

Зависимость среднегодовой РВЭУ от средней скорости ветра для Севера ЕТР (без процедуры сглаживания)



Зависимость среднегодового $K_{иум}$ ВЭУ мощности ≈ 2 МВт от средней скорости ветра для Севера ЕТР (со сглаживанием)



Слайд 11 Исследование методических

вопросов:

зависит ли $\omega(\Delta V)$ от местности, региона, времени года, ...???

метод исследования: сравнение $\omega(\Delta V)$ на разных МС с использованием БД

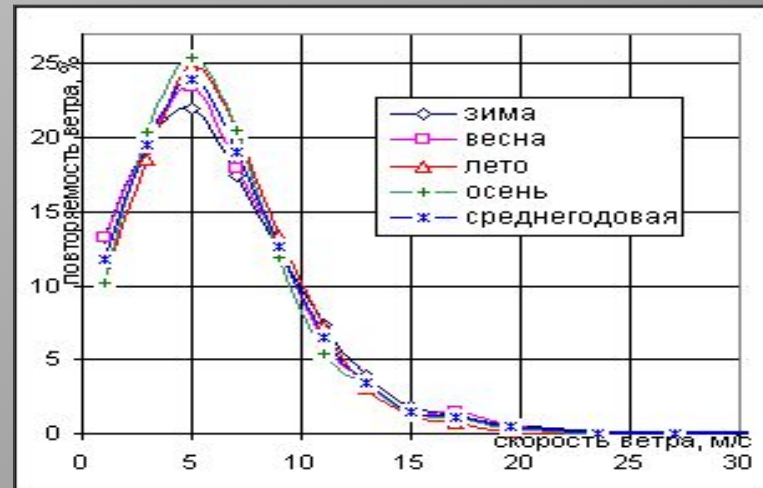
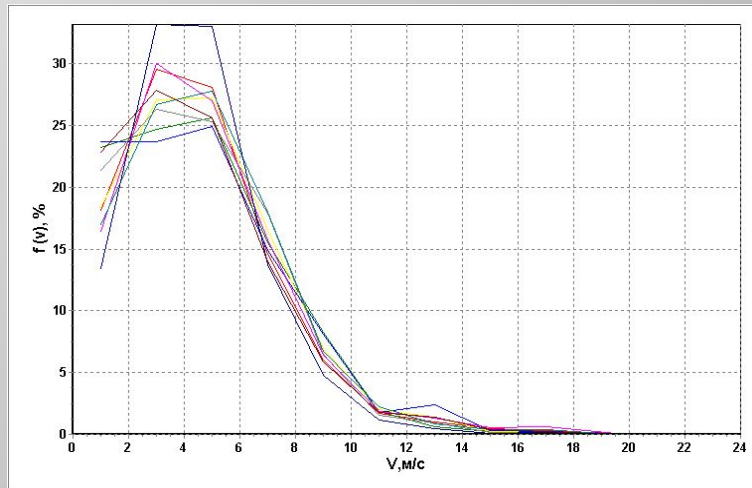
Выводы: ► $\omega(\Delta V)$ проявляют региональные и сезонные отличия

► в ряде регионов $\omega(\Delta V)$ имеет второй максимум при $V = 12-17$ м/с

► Выбор $\omega(\Delta V)$ и построение для больших скоростей ветра ограничен статистической обеспеченности данными (число $\omega(\Delta V)$ падает)

Форма $\omega(\Delta V)$ обнаруживает тесную (по значению $\sum p(V_i) \cdot \omega_i$) связь со скоростью ветра => повод для построения табулированных $f(V)$ и $G(v)$

Определение функции $G(v)$ в данном месте основано на статистическом моделировании средних региональных и сезонных однопараметрических (зависящие от средней скорости ветра) табулированных функций распределения ветра по скоростям по данным о повторяемости ветров по градациям, полученным на всех АС и МС рассматриваемого региона.



Слайд 12

Статистическое моделирование функций $G(V)$ по эмпирическим повторяемостям ветра по метеоданным МС

Архангельск, $G(V)$ для зимы по данным метеорологических станций в радиусе $R = 600$ км

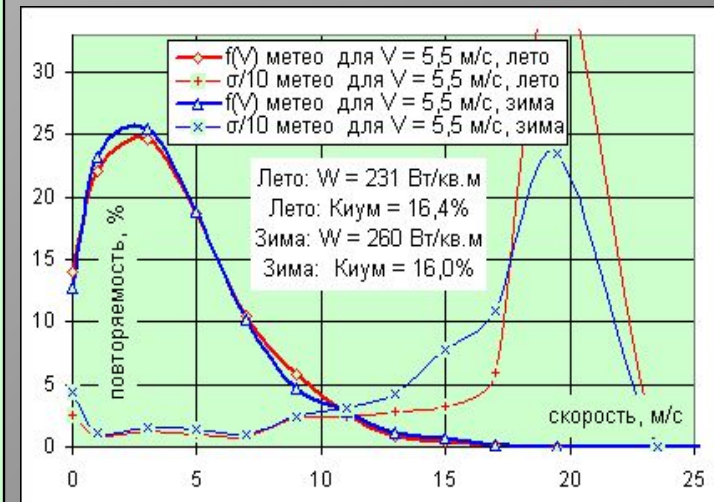
| V, м/с | Центры градаций скорости, м/с | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19,5 | 23,5 | 27 | 32 |
| 3,0 | 41,8 | 30,1 | 17,4 | 6,8 | 2,42 | 0,86 | 0,38 | 0,09 | 0,04 | 0,03 | 0 | 0 | 0 |
| 3,5 | 35,9 | 28,7 | 20,4 | 9,5 | 3,32 | 1,06 | 0,74 | 0,2 | 0,13 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| 4,0 | 27,5 | 29,7 | 22,7 | 12,3 | 4,86 | 1,38 | 1,04 | 0,29 | 0,25 | 0,05 | 0 | 0 | 0 |
| 4,5 | 26,6 | 26,3 | 20,6 | 13,4 | 6,72 | 2,85 | 1,99 | 0,78 | 0,6 | 0,15 | 0,01 | 0 | 0 |
| 5,0 | 20,6 | 23,9 | 23,1 | 15,4 | 8,17 | 3,94 | 2,91 | 1,06 | 0,66 | 0,19 | 0,01 | 0 | 0 |
| 5,5 | 12,7 | 23,4 | 25,6 | 18,9 | 10,1 | 4,56 | 2,76 | 1,09 | 0,73 | 0,14 | 0,01 | 0 | 0 |
| 6,0 | 13,0 | 19,9 | 22,6 | 17,5 | 12,3 | 7,03 | 3,91 | 1,79 | 1,19 | 0,54 | 0,09 | 0,07 | 0,02 |
| 6,5 | 15,2 | 18,5 | 20,1 | 16,3 | 12,3 | 7,92 | 4,78 | 2,05 | 1,64 | 0,81 | 0,12 | 0,09 | 0,03 |
| 7,0 | 11,2 | 15,1 | 18,9 | 16,9 | 13,6 | 10,1 | 6,35 | 3,53 | 2,73 | 1,37 | 0,12 | 0,04 | 0 |
| 7,5 | 10,0 | 14,8 | 18,9 | 17,3 | 14,0 | 10,2 | 6,61 | 3,64 | 2,9 | 1,48 | 0,15 | 0,04 | 0 |
| 8,0 | 8,2 | 12,9 | 17,0 | 15,8 | 15,0 | 11,0 | 8,2 | 4,24 | 4,52 | 2,67 | 0,28 | 0,13 | 0,01 |
| 8,5 | 6,1 | 10,9 | 16,2 | 17,5 | 16,5 | 11,7 | 8,71 | 5,02 | 4,33 | 2,7 | 0,3 | 0,09 | 0,01 |
| 9,0 | 4,4 | 9,7 | 14,9 | 17,6 | 16,3 | 12,4 | 9,5 | 6,06 | 5,14 | 3,42 | 0,56 | 0,09 | 0,01 |
| 9,5 | 4,5 | 8,5 | 13,1 | 16,1 | 15,0 | 14,0 | 9,82 | 6,49 | 6,84 | 4,7 | 0,85 | 0,21 | 0,03 |
| 10,0 | 4,3 | 8,0 | 12,4 | 15,2 | 14,4 | 13,9 | 9,94 | 7,26 | 7,45 | 5,56 | 1,15 | 0,37 | 0,06 |
| 10,5 | 2,5 | 7,2 | 12,1 | 14,2 | 13,7 | 14,0 | 11,4 | 8,53 | 8,02 | 6,12 | 1,5 | 0,54 | 0,07 |
| 11,0 | 2,1 | 5,9 | 10,9 | 11,6 | 13,0 | 17,0 | 12,2 | 7,94 | 9,03 | 7,07 | 2,02 | 0,99 | 0,28 |
| 11,5 | 1,7 | 5,9 | 10,5 | 10,9 | 12,4 | 17,0 | 11,5 | 8,35 | 9,25 | 8,48 | 2,26 | 1,16 | 0,37 |
| 12,0 | 1,5 | 5,8 | 9,9 | 10,4 | 11,8 | 16,4 | 10,9 | 8,67 | 10,0 | 9,98 | 2,45 | 1,31 | 0,52 |

Широта 65° сш Долгота 40° вд

| V, м/с | N | Штиль, V < 4 м/с, % | Уд.мощн. W, Вт/м² | σ_w , % | V 80 2 MW | $\sigma_{P_{взв}}$, % |
|--------|----|---------------------|-------------------|----------------|-----------|------------------------|
| 3,05 | 7 | 71,9 | 66,7 | 30,9 | 87 | 23,8 |
| 3,48 | 26 | 64,6 | 93,7 | 22,8 | 119 | 18,5 |
| 3,98 | 58 | 57,2 | 123,1 | 19,4 | 158 | 14,1 |
| 4,45 | 23 | 52,9 | 188,8 | 24,3 | 224 | 13,9 |
| 5,02 | 26 | 44,5 | 237,2 | 21,1 | 281 | 11,5 |
| 5,52 | 35 | 36,1 | 259,6 | 16,2 | 319 | 7,8 |
| 6,10 | 11 | 32,9 | 377,6 | 22,2 | 405 | 10,3 |
| 6,27 | 8 | 33,8 | 435,2 | 12,4 | 439 | 3,6 |
| 7,15 | 12 | 26,3 | 568,1 | 8,3 | 552 | 3,4 |
| 7,32 | 15 | 24,8 | 593,3 | 9,8 | 569 | 3,2 |
| 8,08 | 7 | 21,1 | 775,4 | 11,2 | 661 | 4,6 |
| 8,43 | 7 | 17,0 | 809,1 | 9,6 | 705 | 2,4 |
| 8,98 | 5 | 14,1 | 933,9 | 12,6 | 769 | 5,3 |
| 9,56 | 9 | 12,9 | 1129,9 | 11,7 | 834 | 3,7 |
| 9,92 | 7 | 12,3 | 1262,7 | 7,0 | 867 | 3,1 |
| 10,5 | 3 | 9,7 | 1406,4 | 6,4 | 926 | 4,7 |
| 11,2 | 5 | 7,9 | 1707,3 | 10,9 | 987 | 1,8 |
| 11,5 | 8 | 7,6 | 1857,3 | 8,8 | 1005 | 2,6 |
| 11,8 | 6 | 7,3 | 2041,9 | 6,9 | 1026 | 1,9 |

Архангельск, СКВО $G(V)$ по градациям для зимы по данным МС в $R = 600$ км

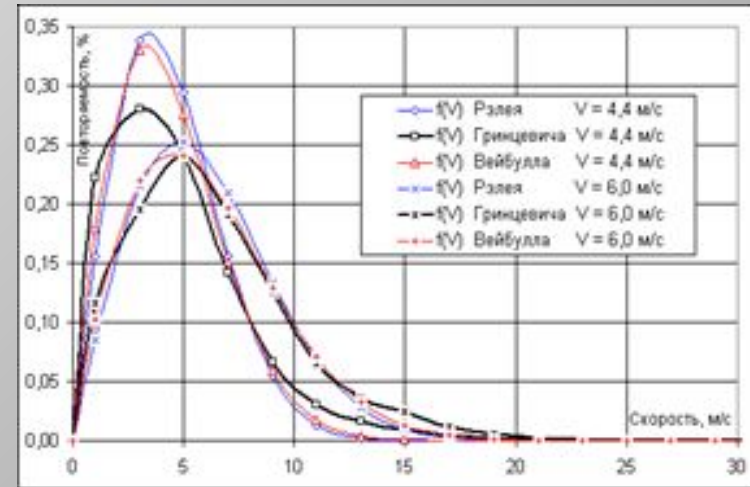
| V, м/с | Центры градаций скорости, м/с | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|
| | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19,5 | 23,5 | 27 | 32 |
| 3,0 | 11,5 | 14,6 | 15,0 | 14,8 | 32,8 | 56,2 | 120,8 | 94,97 | 242 | 245 | 0 | 0 | 0 |
| 3,5 | 16,1 | 20,9 | 14,4 | 12,3 | 26,4 | 54,4 | 60,8 | 105 | 108 | 163,9 | 390,5 | 391 | 0 |
| 4,0 | 19,0 | 15,4 | 13,2 | 12,3 | 23,2 | 59,9 | 44,0 | 85,5 | 81,5 | 168,1 | 435,2 | 0 | 0 |
| 4,5 | 23,9 | 14,5 | 18,8 | 17,0 | 11,1 | 46,7 | 40,2 | 90,76 | 65,7 | 132,5 | 306,3 | 469 | 0 |
| 5,0 | 36,5 | 18,4 | 22,5 | 15,7 | 13,1 | 31,6 | 24,3 | 57,44 | 78 | 116,1 | 198,4 | 243 | 0 |
| 5,5 | 44,4 | 10,8 | 15,4 | 14,8 | 10,5 | 24,0 | 30,6 | 42,46 | 77,9 | 109,4 | 235,5 | 0 | 0 |
| 6,0 | 33,0 | 5,0 | 20,3 | 21,2 | 8,7 | 26,6 | 33,3 | 25,51 | 46,4 | 74,05 | 103,8 | 145 | 167 |
| 6,5 | 21,2 | 11,0 | 12,2 | 18,4 | 9,7 | 19,2 | 20,0 | 16,15 | 21,3 | 46,83 | 88,3 | 133 | 132 |
| 7,0 | 20,4 | 10,4 | 8,5 | 7,4 | 11,1 | 7,2 | 7,9 | 32,66 | 17,5 | 40,1 | 70,9 | 94,7 | 297 |
| 7,5 | 27,1 | 10,2 | 8,9 | 10,5 | 13,3 | 5,9 | 11,5 | 31,24 | 24,9 | 47,66 | 51,0 | 119 | 255 |
| 8,0 | 27,5 | 13,9 | 7,0 | 9,3 | 5,8 | 10,6 | 3,9 | 25,17 | 15,1 | 37,36 | 40,0 | 50,6 | 115 |
| 8,5 | 49,8 | 8,4 | 7,3 | 14,4 | 10,9 | 8,6 | 6,9 | 11,29 | 20 | 33,25 | 34,6 | 93,7 | 144 |
| 9,0 | 53,5 | 12,5 | 5,3 | 9,1 | 12,9 | 13,5 | 16,5 | 14,78 | 11,6 | 41,27 | 66,0 | 109 | 200 |
| 9,5 | 37,9 | 12,5 | 9,9 | 11,0 | 11,4 | 13,7 | 13,9 | 13,24 | 17,9 | 28,83 | 41,3 | 65,3 | 125 |
| 10,0 | 37,5 | 10,9 | 7,0 | 6,2 | 5,8 | 10,1 | 12,5 | 13,22 | 13,9 | 20,66 | 42,2 | 24,2 | 74,5 |
| 10,5 | 17,8 | 18,1 | 7,2 | 8,6 | 3,7 | 10,6 | 14,7 | 2,97 | 11,3 | 19,49 | 36,1 | 11,5 | 70,7 |
| 11,0 | 12,2 | 3,5 | 8,5 | 8,2 | 10,1 | 9,4 | 10,4 | 10,87 | 10,9 | 11,02 | 28,6 | 42,1 | 65,5 |
| 11,5 | 35,1 | 3,2 | 9,7 | 6,6 | 8,5 | 8,0 | 9,7 | 14,21 | 11,8 | 16,71 | 18,8 | 29,2 | 54 |
| 12,0 | 44,3 | 4,2 | 8,4 | 6,7 | 4,0 | 6,6 | 2,8 | 15,24 | 11,6 | 7,14 | 9,4 | 17,9 | 52,6 |



Слайд 13

Сравнение функций плотности распределения ветра по скоростям:

Вейбулла, Рэля и $G(V)$ (Гринцевича), построенным по среднегодовым скоростям для Калининграда ($V_{CP} = 4,4$ м/с) и Балтийска ($V_{CP} = 6,0$ м/с) по данным метеостанций Балтийского региона.



Значения удельной мощности ветра на высоте 10 м для Калининграда и Балтийска, рассчитанные с использованием разных функций распределения

| Аппроксимирующая функция $f(V)$ | | Вейбулла | Гринцевича | Рэля |
|---------------------------------|--------------------|----------|------------|-------|
| Калининград | $V_{CP} = 4,4$ м/с | 106,5 | 133,3 | 99,6 |
| Балтийск | $V_{CP} = 6,0$ м/с | 271,4 | 323,8 | 252,7 |

СКВО, рассчитанные по данным АС при определении W и $P_{ВЭУ}$ в р-не Барабинска, в 2–4 раза меньше, чем по данным МС.

| Параметр | Средние годовые | | | Зима | | |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| | Метео, $R = 340$ км | Метео, $R = 680$ км | Аэро, $R = 680$ км | Метео, $R = 340$ км | Метео, $R = 680$ км | Аэро, $R = 680$ км |
| Удельная мощность ветра | 14,31 | 16,66 | 3,35 | 15,79 | 18,05 | 8,28 |
| $P_{ВЭУ}$ VESTAS V-80 – 2,0 МВт | 6,94 | 6,95 | 1,64 | 6,55 | 6,64 | 3,52 |
| $P_{ВЭУ}$ Siemens SWT – 2,3 93 | 6,48 | 6,55 | 1,87 | 6,00 | 6,16 | 3,36 |
| $P_{ВЭУ}$ ENERCON E 82 – 2,0 МВт | 6,43 | 6,46 | 1,84 | 5,90 | 5,98 | 3,31 |

Слайд 14

Методики достоверного определения ВЭП и мощности ВЭС на территории России, стран СНГ и Балтии

Классическое определение $f(V)$ на высоте оси ветроколеса $H_{ВК}$ производится подъемом границ градаций скорости ветра при сохранении их повторяемости внутри самих градаций $f(V)$, определенной по данным метеорологических измерений (8 – 16 м) с помощью более или менее достоверных моделей $V(h)$.

Таблица 3.4. Методики моделирования и аппроксимации высотных профилей скорости в приземном 100 – 200-метровом слое

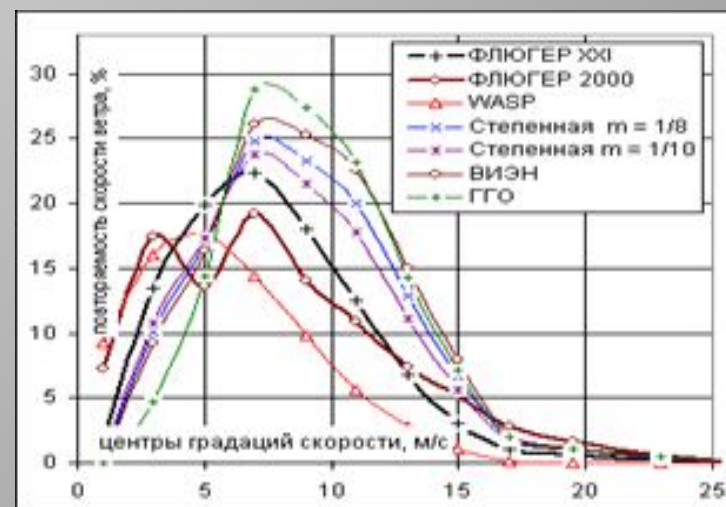
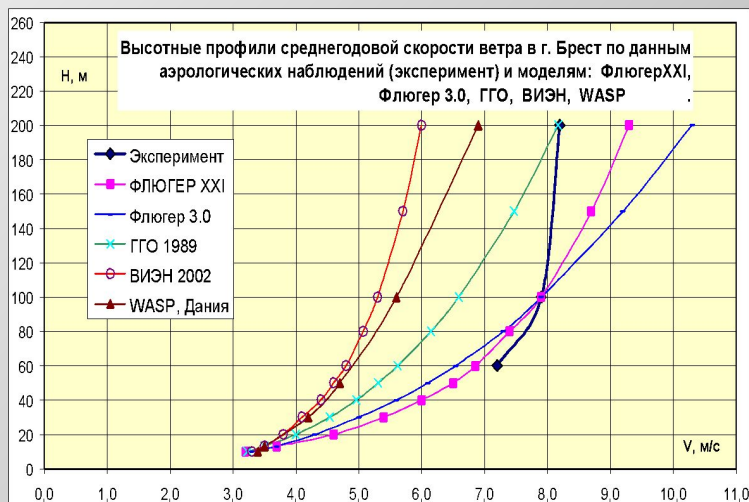
| № | Методика, разработчик | Используемые метеоданные | Используемые аэроданные | Аппроксимация распределения $f(V)$ | Аппроксимация высотного профиля |
|---|---------------------------------|--|--|--|--|
| 1 | Универсальная модель | соседней МС (2200 МС РФ) | не используются | любая известная, соответствующая скорости и высоте | $V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ $m = 1/7$ для суши $m = 1/10$ для моря |
| 2 | WASP, RISO, Дания | соседней МС + модель Z_0 (332 МС РФ) | не используются | функции Вейбулла по метеоданным с подъемом на высоту | $V(z) = V_0 \cdot \ln(z/z_0)$ |
| 3 | NASA, NREL, США | модель с разрешением 1x1 км | не используются | функция Рэля по метеоданным | $V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ |
| 4 | ЦАГИ, 1960 | соседних МС-аналогов (≈ 500 МС) | не используются | функции Колодина и Поморцева | $V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ |
| 5 | ГГО, 1989 | соседних МС (≈ 1100 МС РФ) | не используются | Γ -функции по данным ближайших МС | $V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ |
| 6 | ФЛЮГЕР 3.0, ЦАГИ, 1994 | соседних МС класса 76 и 66 (≈ 1000 МС РФ) | V на уровне 100 м соседней станции | табулированные региональные функции Гринцевича | $V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ $m = \ln(V_{100}/V_{фл}) / \ln(H_{100}/H_{фл})$ |
| 7 | АО “ВИЭН”, 2002 | соседних МС (≈ 1100 МС РФ) | Не используются | подъем эмпирических повторяемостей | $V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ |
| 8 | ФЛЮГЕР 2000, НИЦ “АТМОГРАФ” | соседних МС класса 76 (≈ 1000 МС РФ) | V на 100 м по данным всех АС района | Табулированные региональные функции Гринцевича | $V(z) = V_{фл} \cdot (z/h_{фл})^m$ |
| 9 | ФЛЮГЕР XXI, НИЦ “АТМОГРАФ” 2003 | средние статистические по району с очисткой (≈ 1100) | V на $h = 100, 200, 300$ и 600 м всех АС региона | Табулированные региональные функции Гринцевича | С моделированием $V_{суша}(z) = V_c \cdot \ln(z/z_c)$ $V_{море}(z) = V_m \cdot \ln(z/z_m)$ |

Наиболее распространена за рубежом логарифмическая модель: $V(h) = V^* \cdot [\ln(h) - \ln(Z_0)]$

Слайд 15 а

Методические основы моделирования ВЭП и мощности ВЭУ:

Подъем $\omega_n(\Delta V_n)$ по данным МС на высоту оси ветроколеса $H_{ВК}$ для ВЭУ 80-х годов с $H_{ВК} < 30 - 40$ м был оправдан: экстраполяция с 10–15 м на 30 м не приводила к непоправимым для практики погрешностям, но для современных ВЭУ $H_{ВК}$ достигает 100 – 170 м.



Разброс непоправимо велик для практики для $H_{ВК} > 35-40$ м (вдвое) и зависит от выбора опорной или опорных (каких и в каком количестве) МС и вида аппроксимации $V(h)$, но неприятнее всего – отсутствия критерия истины при использовании только данных МС

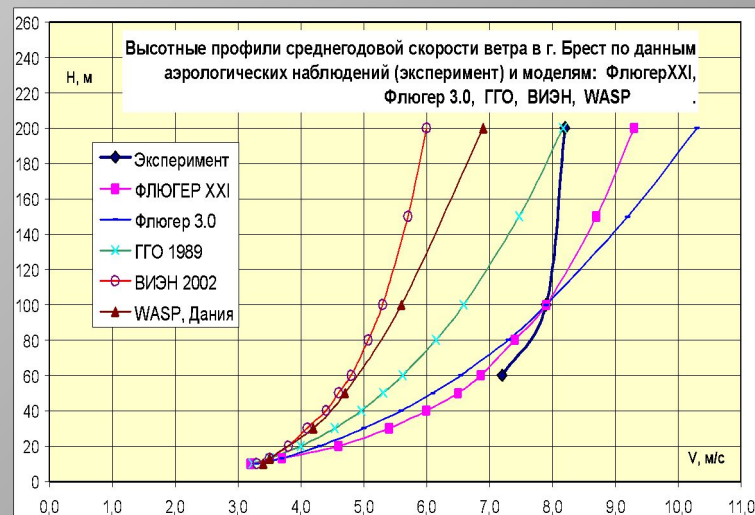
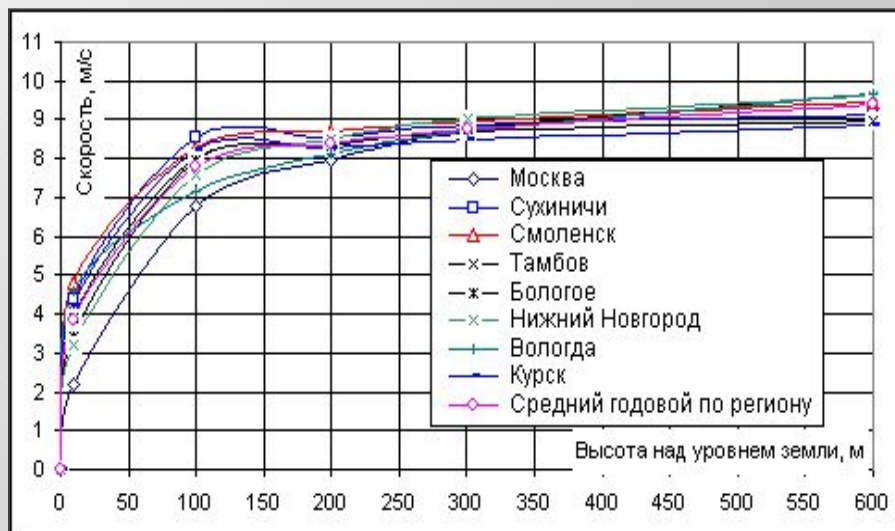
Выход – измерять на высотах или привлекать аэрологические данные !!!

Из-за отсутствия последних Запад развил ветровую разведку, Атропограф пошел путем статистического моделирования, опираясь на аэрологические данные.

Слайд 15 б

Методические основы моделирования ВЭП и мощности ВЭУ:

Для повышения точности моделирования $V(h)$ по данным АС важны установленные факты быстрого нарастания $V(h)$ на высотах 0–100 м и медленного на 100–600 м, и уменьшение их разброса с высотой.



Высотная изменчивость $V(h)$ на 100–600 м по данным АС падает с высотой

Таблица. Высотная изменчивость СКВО (в %) среднегодовых скоростей ветра

| Станция \ Высота | 15 м | 100 м | 200 м | 300 м | 600 м |
|---------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Барабинск | 14,7 | 5,3 | 4,7 | 3,9 | 2,9 |
| Александровск-на-Сахалине | 20,2 | 12,3 | 10,5 | 8,2 | 6,8 |

Слайд 16

Разработка и применение методик достоверного моделирования профилей скорости в ПСА для определения ВЭП и мощности ВЭС

Таблица 3.8. Сравнение модельных данных $V(h)$ на высоте 80 м с осредненными данными 28 АС

| № | Методика | Аппроксимация $V(h)$ | Зима | Весна | Лето | Осень | Год | $\sigma_v, \%$ |
|---|------------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | Эксперимент | Данные эксперимента | 6,4 | 5,9 | 5,5 | 5,8 | 5,9 | 0,0 |
| 1 | Универсальная модель | $V(z) = V_{\text{фл}} \cdot (z/h_{\text{фл}})^m$ $m = 1/7$ для суши $m = 1/10$ для моря | 9,66 8,94 | 7,44 6,88 | 6,14 5,68 | 8,13 7,52 | 7,84 7,25 | 16,4 15,2 |
| 2 | WASP | $V(z) = V_o \cdot \ln(z/z_o)$ | | | | | 5,00 | 15,3 |
| 5 | ГГО | $V(z) = V_{\text{фл}} \cdot (z/h_{\text{фл}})^m$ | 11,28 | 9,10 | 7,83 | 9,68 | 9,47 | 15,4 |
| 6 | Флюгер 3.0, ЦАГИ, 1994 | $V(z) = V_{\text{фл}} \cdot (z/h_{\text{фл}})^m$ $m = \ln(V_{100}/V_{\text{фл}}) / \ln(H_{100}/H_{\text{фл}})$ | 6,51 | 5,84 | 5,37 | 5,83 | 5,89 | 1,74 |
| 7 | АО “ВИЭН” | $V(z) = V_{\text{фл}} \cdot (z/z_{\text{фл}})^m$ | 10,15 | 8,56 | 7,32 | 8,54 | 8,64 | 12,1 |
| 9 | Флюгер XXI “Сэндвич” | Трехслойная модель | 6,53 | 5,87 | 5,42 | 5,85 | 5,92 | 1,56 |

Наиболее точную аппроксимацию $V(h)$ дает разработанная автором трехслойная модель “Сэндвич”, описываемая выше 100 м кубической аппроксимацией средних сезонных данных АС на высотах 100, 200, 300, 600 м. В слое $0-h$ $V(h)$ моделируется логарифмическим профилем (3.5) с параметром z_o , моделируемым по методике WASP, и U_o , определяемым по данным ближайших МС. В слое $h^{\text{метеo}} < h < 100$ м: $V(h)$ аппроксимируется кубическим сплайном с коэффициентами, определяемыми из условий гладкой сшивки с профилем (3.5) на нижней границе и кубическим полиномом – на верхней границе (на 100 м).

Для рассмотренных 28 АС “Сэндвич” обеспечивает точность определения $V(h)$ до 100 м с погрешностью $\leq 6-7\%$. Максимум погрешностей – на высотах 35 – 50 м.

Ее использование позволило оценить высоты применимости логарифмического профиля скорости $h_{\text{лог}}$. Данные на промежуточном уровне использованы в качестве критерия точности моделирования, а искомая высота $h_{\text{лог}}$ определялась минимизацией ошибки расчетов $V(h)$ на промежуточном уровне изменением $h_{\text{лог}}$. Согласно проведенному исследованию использование (3.5) правомочно до $h_{\text{лог}} \leq 20-25$ м

Слайд 17

Разработка и анализ методик достоверного определения ВЭП и мощности ВЭС на территории России (сравнение точности моделей автора и WASP)

Таблица 3.5. СКВО (в процентах) данных методики WASP от многолетних аэрологических

| Высота : | 100 м | | | 200 м | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Методика : | ФЛЮГЕР XXI | WASP (3.5) | WASP (3.6) | ФЛЮГЕР XXI | WASP (3.5) | WASP (3.6) |
| Скорость ветра, м/с | 6,73 | 5,60 | 6,1 | 7,16 | 6,86 | 7,0 |
| Погрешность, % | 0 | 26,5 | 14,2 | 0 | 21,6 | 12,3 |
| Удельн. мощность ветра, Вт/м ² | 561,0 | 293,1 | 423,7 | 818,3 | 510,5 | 653,2 |
| Погрешность, % | 0 | 69,7 | 36,8 | 0 | 63,84 | 38,1 |

Таблица 3.7. Сравнение среднегодовых данных модели и эксперимента АС Новосибирск

| Методика: | $V(z)=V_0 \cdot \ln(z/z_0)$ (ФЛЮГЕР XXI) | $V(z) = V_{\text{фл}} \cdot (z/z_{\text{фл}})^m$ (ФЛЮГЕР 3.0) | $V(z)=V_{\text{фл}} (z/z_{\text{фл}})^m$ (ВИЭН) | $V(z)=V_{\text{фл}} \cdot (z/z_{\text{фл}})^m$ (ГГО 1989) | WASP, (3.5) | RISO (3.6) |
|---|---|--|--|--|----------------|---------------|
| $V_{\text{эксп}} - V_{\text{мод}}, 60 \text{ м}$ | 4,7 % | 9,3 % | 35,2 % | 21,9 % | 31,9% | 17,5% |
| $V_{\text{эксп}} - V_{\text{мод}}, 100 \text{ м}$ | 0 % | 0 % | 34,8 % | 16,6 % | 29,1% | 15,9% |

Таблица 3.6. Сравнение расчетных по модели WASP и экспериментальных параметров ветра [3]

| Метеостанция / Параметр : | Скорость ветра, м/с | | Удельная мощность, Вт/м ² | |
|------------------------------|---------------------|-------|--------------------------------------|-------|
| | 100 м | 200 м | 100 м | 200 м |
| Высота : | 100 м | 200 м | 100 м | 200 м |
| Балчуг, модель (3.5) | 2,8 | 3,5 | 25 | 49 |
| Ново-Иерусалим, модель (3.5) | 4,1 | 5,0 | 85 | 167 |
| Егорьевск, модель (3.5) | 5,7 | 7,0 | 197 | 384 |
| Данные измерений на АС | 6,7 | 7,5 | 392 | 506 |

Наиболее авторитетная и достоверная международная аналитическая методика WASP (RISO) не достаточно точна для практического применения как за рубежом (корректируется данными ветровой разведки), так и в России !!!

Слайд 18

Наличие ветра в России (по данным моделей WASP и "Сэндвич") Среднегодовая скорость ветра на высоте 50 м над землей

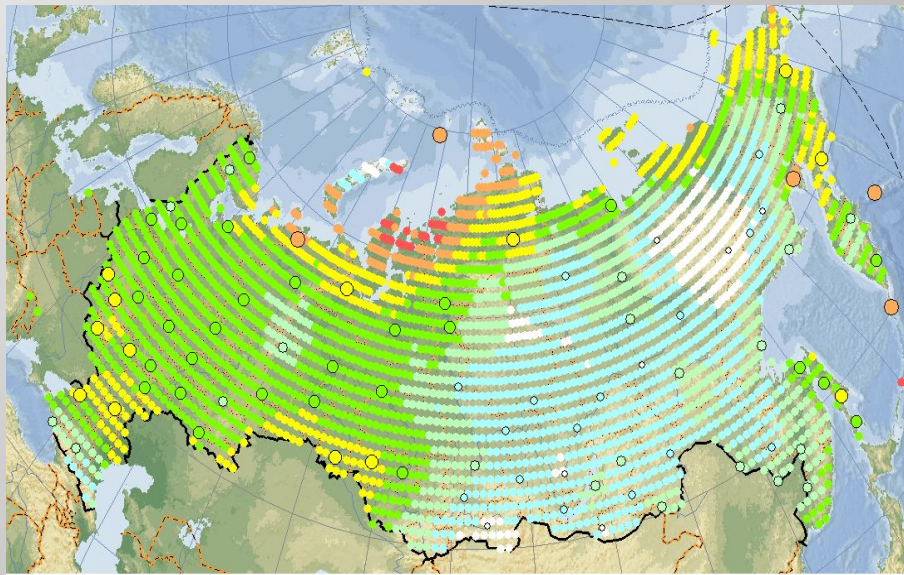
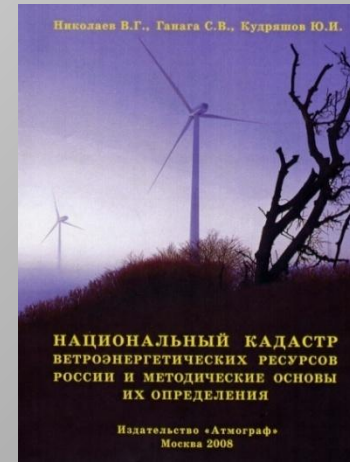


Рис.1 Карта распределения скорости ветра на высоте $h=35$ м в узлах координатной сетки. Среднее значение за год.

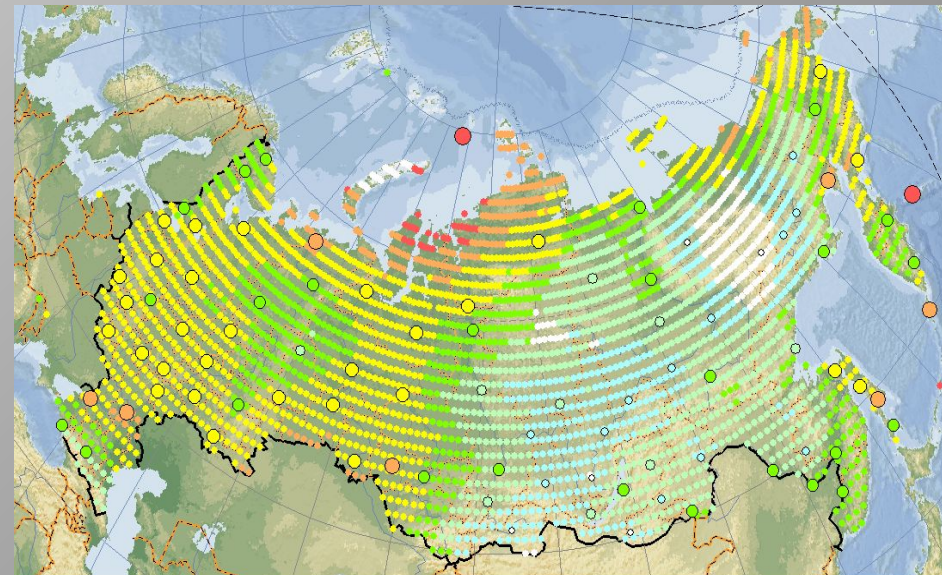


Рис.1 Карта распределения скорости ветра на высоте $h=50$ м в узлах координатной сетки. Среднее значение за год.



Принципиальная новизна, обеспечивающая эффективность современных методик определения ВЭП и ВЭУ

- ▶ Использование совместно с метеоданными (10 – 14 м) аэрологических данных для высот 100, 200, 300, 600 м и в силу малой межстанционной их изменчивости моделировать ветровые характеристики на высотах до 200 м с погрешностью $\leq 10 - 13\%$ для равнинных и $\leq 20 - 24\%$ для горных территорий и рассчитывать **высотные** профили скорости ветра в 200-метровом слое атмосферы с требуемой для практики точностью $\leq 25\%$.
- ▶ Использовании более обоснованных физически и статистически и точных по сравнению с используемыми ныне развитого автором метода численного моделирования ветровых характеристик в приземном 200 -метровом слое атмосферы **с учетом местных особенностей рельефа и подстилающей поверхности, основанного на классификации Милевского.**
- ▶ **Цель учета свойств рельефа и поверхности – уменьшение неопределенности определения характерной местной скорости ветра методами статистического моделирования с использованием методики “очистки” данных**

Первичные и “очищенные” значения среднегодовых скоростей ветра и его среднеквадратических отклонений (СКВО) в районе метеорологических станций в разных регионах России

| Местонахождение метеостанции | Данные ГМС | | Данные ГМС “очисткой” | |
|------------------------------|---------------|---------|-----------------------|---------|
| | скорость, м/с | СКВО, % | скорость, м/с | СКВО, % |
| Волгоград | 4,12 | 21,7 | 5,25 | 11,5 |
| Москва (Сергиев Посад) | 3,64 | 12,7 | 4,1 | 8,62 |
| Мурманск | 4,41 | 38,8 | 5,61 | 15,3 |

Слайд 20

Методика “очистки” метеорологических данных, основанная на классификации Милевского.

С учетом повторяемости ветров по направлениям θ_i для каждого месяца и сезона для каждой МС рассчитан и используется средний коэффициент Милевского $K_{\text{Мср}}^{\text{М}} = \sum 8K_i \cdot \theta_i / 8$. Его связь со скоростями ветра дана на рис.3.8. В методике автора классификация Милевского используется для “очистки” данных МС, или приведения их к условиям ровной плоской поверхности без элементов экранирования (класса 7б по Милевскому). Статистическая связь $K_{\text{Мср}}$ и z_0 по классификации WASP, установленная автором по данным 200 российских МС с достоверностью $R^2 > 0,9$ описывается регрессионным уравнением: $\ln(z_0) = 0,0021 \cdot K^3 - 0,0845 \cdot K^2 + 0,645 \cdot K + 3,314$. Согласно (3.9) коэффициенту $K_{\text{Мср}}$ класса 7б соответствует $z_0 = 0,04$ (класс 1 по WASP с $z_0 = 0,03$), а $K_{\text{Мср}}$ класса 6б и 11б – $z_0 = 0,1$ и $z_0 = 0,0002$ (классы 2 и 0 по WASP).



Рис. 3.8. Зависимость среднегодовой скорости ветра от коэффициентов Милевского



Рис. 3.9. Связь коэффициентов Милевского и параметра z_0 по классификации WASP

Слайд 21

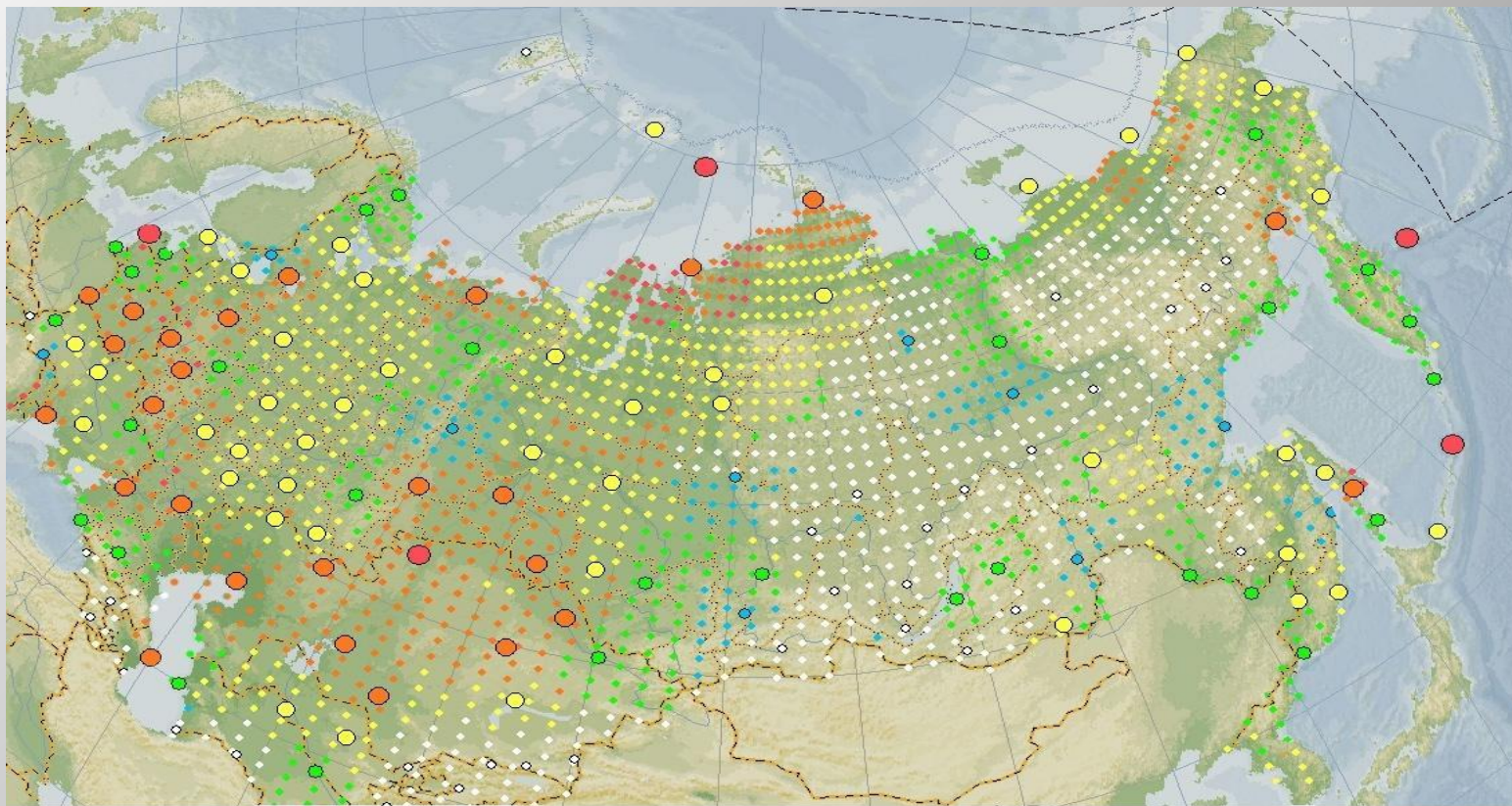
Глава 4 “Исследование возможностей и эффективности использования ВЭС в различных регионах и субъектах РФ”

- ▶ Исследованы перспективы и эффективности использования ВЭС для выработки *ЭлЭн* в промышленных масштабах в различных регионах и субъектах РФ.
- ▶ Исследованы и установлены новые закономерности территориального, сезонного и высотного распределения на территории РФ скоростей V_{CP} , удельных мощностей ветра W_{CP} , вероятностей ветроэнергетических штилей $P_{\text{шт}}$ ($V \leq 4$ м/с) и погрешностей их определения.
- ▶ Существенно уточнены количественные параметры ВЭП на традиционно считающихся перспективными для использования ВЭС побережьях морей Северного Ледовитого и Тихого океанов.
- ▶ Выявлены новые регионы страны, перспективные для экономически эффективного использования ВЭУ большой и средней мощности.



Слайд 22

Распределение по территории России коэффициентов использования номинальной мощности ВЭУ V90 с диаметром ВК 90 м и высотой башни 100 м



Коэффициент использования номинальной мощности (%)

VESTAS V-90 3МВт с высотой башни 100м на территории

России, стран СНГ и Балтии. Среднегодовой.



Места, отмеченные на карте оранжевым и красным, обладают достаточным ВЭП по любым международным критериям, обеспечивающим коэффициенты использования номинальной мощности ВЭУ $K_{иум} \geq 30\%$ (≥ 2700 тысяч часов работы ВЭС с номинальной мощностью).

Технический ветроэнергетический потенциал России

проведен с допущением о 10%-ном землеотводе под ВЭС по средней для субъектов мощности “типовой” ВЭУ V90 с $H_{ВК} = 100$ м при оптимальном размещении ВЭУ в узлах правильной треугольной сетки с плотностью на 1 км^2 $N_{\Delta} = 1,155 \cdot (1000/n \cdot D)^2$, выбранной на основе анализа $K_{ИУМ}$. Средние за ресурс коэффициенты $K_{Нид}$ и $K_{ТГ}$ в расчетах равны $K_{Нид} = 0,81$ и $K_{ТГ} = 0,94$. Среднее по РФ расчетное значение $K_{ИУМ}$ ВЭУ V90 с башней 100 м составляет $\approx 19,6\%$, чему соответствует с учетом погрешности вычислений средняя годовая мощность $P_{ВЭУ} = 588 \pm 87$ кВт. До 30 субъектов РФ обладают ВЭР, достаточными для эффективного их использования по всем международным критериям ($K_{ИУМ} \geq 28\%$).

Таблица 4.3. Технический потенциал ВЭР по Федеральным округам РФ.

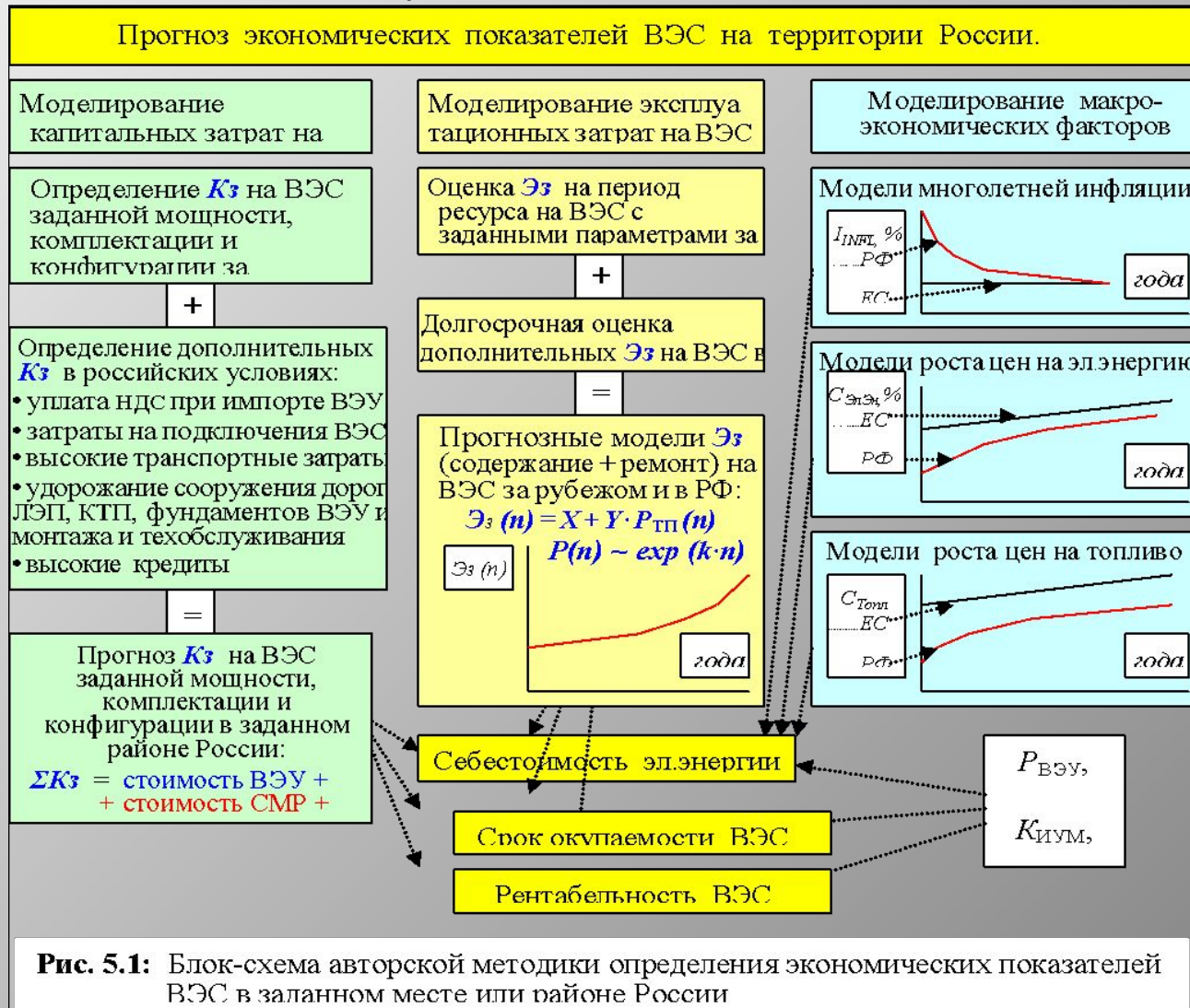
| № | Федеральный округ | Технический потенциал по автору, млрд. кВт·ч/год | Технический потенциал по [13], млрд. кВт·ч/год |
|---|-------------------|--|--|
| 1 | Центральный | 588 | 71,8 |
| 2 | Северо-западный | 1428 | 432,6 |
| 3 | Южный | 564 | 176,6 |
| 4 | Приволжский | 872,8 | 236,3 |
| 5 | Уральский | 1 577 | 1 617,0 |
| 6 | Сибирский | 2 754 | 1 513,0 |
| 7 | Дальневосточный | 3 689 | 2 469,4 |
| | ИТОГО: | 11 473 | 6 516,6 |

Суммарный технический ВЭП РФ вдвое превышает оценки предшественников, при этом его доля в Центральном, Северо-Западном, Приволжском и Южном ФО, где проживает 73% населения РФ составляет 30% против полученных ранее 14%, что более перспективно для широкомасштабного использования ВЭС

Вывод: ВЭП имеют вполне благоприятное распределение по России для их промышленного освоения и широкомасштабного использования и в 13 раз превышает годовую выработку всех ЭС страны. Требуемая площадь под ВЭС с годовой выработкой ≈ 80 млрд кВтч – 0,7% от территории страны.

Глава 5. “Оценка экономических показателей современных ВЭС на территории РФ и возможного экономического эффекта их широкомасштабного использования”

Схема методики моделирования экономических показателей ВЭС в местах и районах их предполагаемого использования



Слайд 25

Минимизация погрешностей из-за неопределенности долгосрочного прогноза Эз на ВЭС и ТЭС при высоком и нелинейном росте инфляции и цен на ЭЛЭН и газ и неустановленной правовой базе, достигнута построением для них стоимостных моделей $Kз$ и Эз в условиях России с учетом их многолетнего хода.

Согласно исследованию неадекватный прогноз макроэкономических факторов может приводить к погрешностям >20–30% при прогнозе экономических показателей ВЭС

Развитая модель эксплуатационных затрат на ВЭС построена автором в предположении линейной связи Эз_n с вероятностью простоев ВЭУ $P_{\text{ТП}}(n)$ в n -м году: $S_n(n) = S_0 + \$ \cdot P_{\text{ТП}}(n)$ (5.6) с использованием обобщенных данных о многолетнем ходе Эз на ВЭС в странах ЕС,



Многолетний ход среднегодовых Эз на ВЭУ разных поколений (эксплуатационные данные в % $Kз$)

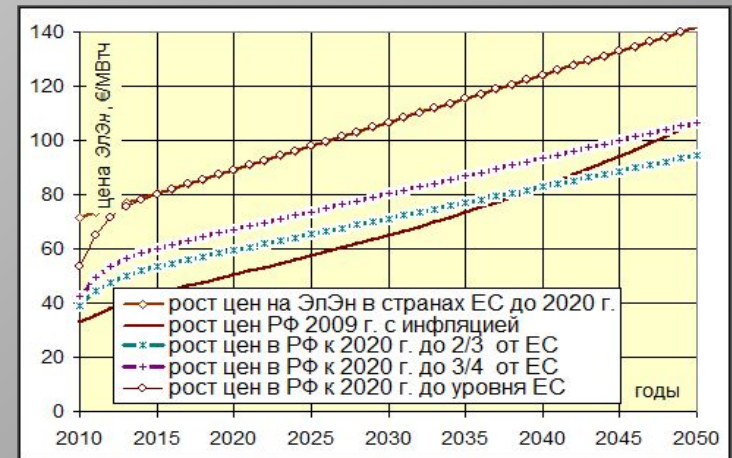
| Тип ВЭУ | Годы эксплуатации | 1–2 | 3–5 | 6–10 | 11–15 | 16–20 |
|--------------------------|-------------------|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ВЭУ 600 кВт в ЕС | | 1,0 | 1,9 | 2,2 | 3,5 | 4,5 |
| <i>ВЭУ 600 кВт в ЕС</i> | | | <i>1,88–1,92</i> | <i>2,11–2,26</i> | <i>4,21–4,73</i> | <i>4,42–5,09</i> |
| <i>ВЭУ 2000 кВт в ЕС</i> | | | <i>1,87–1,94</i> | <i>2,20–2,33</i> | <i>4,04–4,47</i> | <i>4,44–4,96</i> |

Слайд 26

Связь Эз на ВЭС с переменной инфляцией I_n описывается разработанной автором моделью: $I_n = (I_0 - I_\infty) \cdot \exp(-k_1 \cdot n) + I_\infty$, где I_0 , I_n и I_∞ – индексы инфляции в год пуска ВЭС, в n -ный и 20-ый года работы ВЭУ

Доходная составляющая ВЭС определяется выручкой за ЭлЭн или экономией замещенного ими топлива. Сценарии цены на топливо в РФ ограничены сверху ценами ЕС, а снизу – ценами, растущими с инфляцией.

Рост тарифов и цен на ЭлЭн ε_n и топливо f_n моделируется автором моделями типа:
 $\varepsilon_n = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \cdot \exp(-K_\varepsilon \cdot n) + \varepsilon_\infty$ (5.9) и
 $f_n = (f_0 - f_\infty) \cdot \exp(-K_f \cdot n) + f_\infty$ (5.10), где ε_n , ε_0 и ε_∞ – индексы цен на ЭлЭн, а f_n , f_0 и f_∞ – индексы цен на газ в году ввода ВЭС, в n -ном году и последнем году эксплуатации (рис. 5.3).

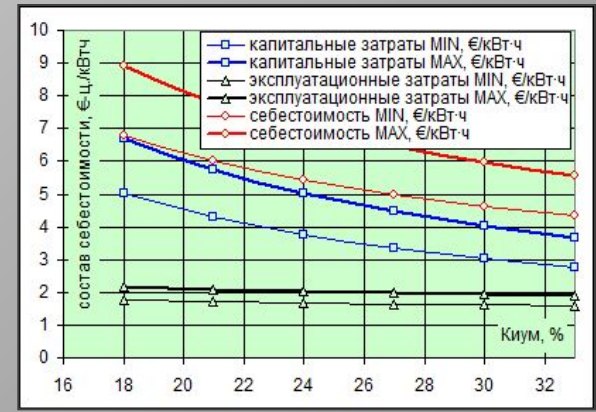
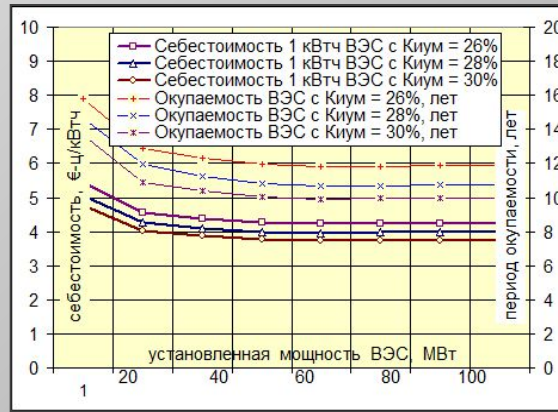


Методика прогноза экономических показателей ЭС с учетом возможных сценариев и нелинейности моделей реализована программой их расчета и сравнительного анализа на ПЭВМ, выдающей на выходе в цифровом и графическом виде временные ряды затрат, доходов и их балансов (ежегодных, суммарных к n -му году и средних за срок их работы) и расчетные значения себестоимости ЭлЭн, сроков окупаемости и рентабельности ВЭС.

Слайд 27

Разработанной методикой решен ряд методических и практических задач.

► исследована чувствительность моделей K_3 и Δ_3 ВЭС к изменению определяющих их факторов: $K_{ИУМ}$, $K_{ТГ}$, стоимости ВЭУ, КТП, внутренних и магистральных ЛЭП и дорог, а также наиболее трудно прогнозируемых цен на $\Delta_{ЛЭН}$ и газ и инфляции.



► Выявлено, что неопределенность сценариев их роста в РФ и в ЕС может приводить к погрешностям прогноза баланса на ТЭС и ВЭС до 50%. Количественно определено уменьшение $C_{Эл}$ ВЭС с ростом их мощности

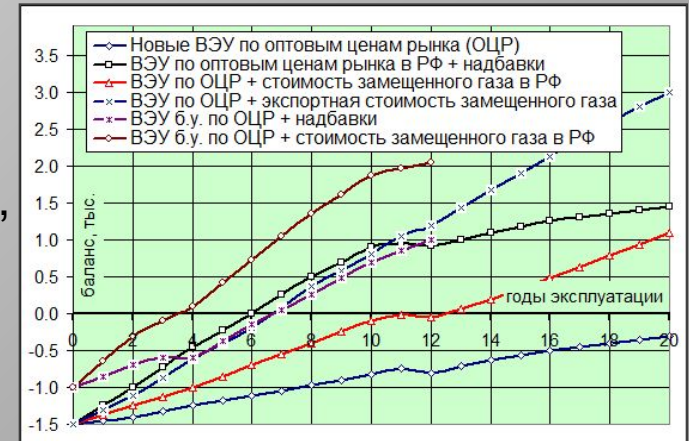
► Анализ затрат на проектирование ВЭС за рубежом установлено, что затраты на проектирование в РФ при использовании методик автора могут быть снижены на 20–25%.

Слайд 28

► дан анализ возможных и выбор наиболее эффективных для РФ схем закупочных цен на *ЭлЭн* ВЭС – необходимого условия широко-масштабного их использования в РФ.

► предложена универсальная и вполне реализуемая схема закупочных цен ВЭС с надбавками к цене *ЭлЭн* оптового рынка, равными стоимости замещенного газа в РФ, обеспечивающая полноценное использование технико-экономических достоинств ВЭС стимулирующая к выбору технологий производства *ЭлЭн*, замещающих органическое топливо и восполняющая при его экспортной реализации затраты по оплате *ЭлЭн* ВЭС и приносящее дополнительный доход стране.

► дан сравнительный анализ экономических показателей вновь строящихся ГазЭС и ВЭС.



Слайд 29.

Сравнения экономических показателей ВЭС и ГазЭС

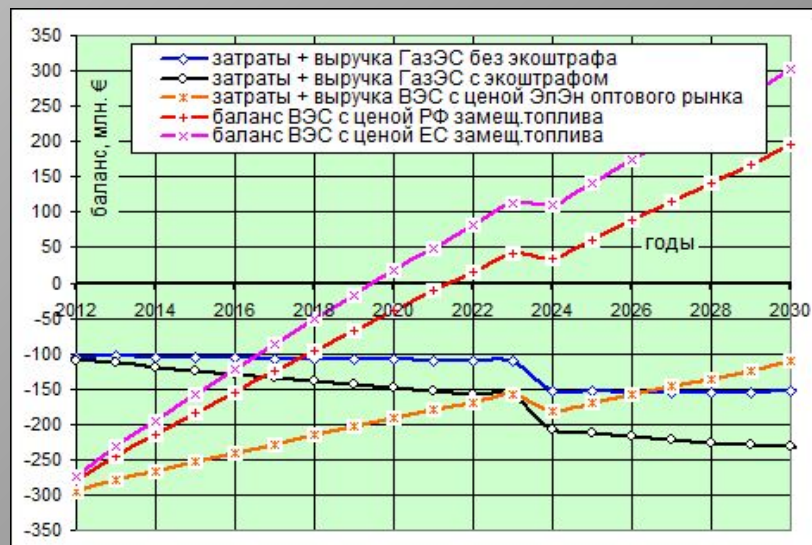
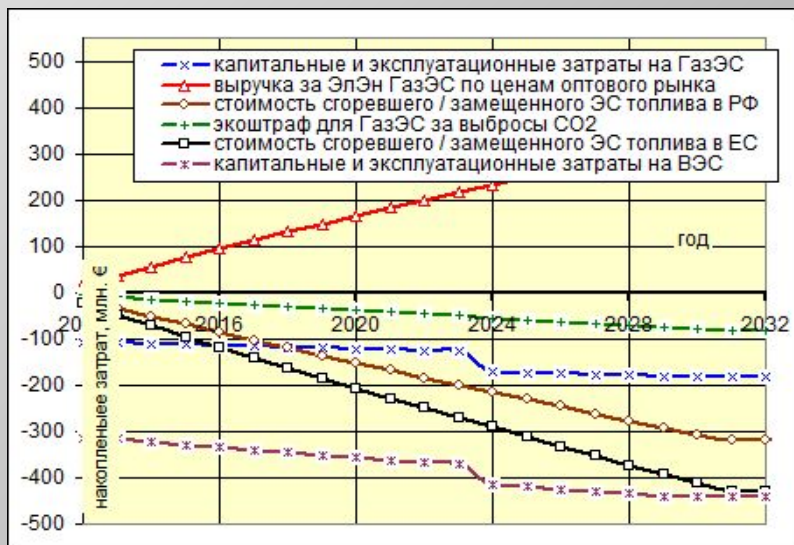
| Сценарий : | 70% от цен ЕС | ВЭС от ГаЭС |
|---|---------------|-------------|
| Показатель | ГазЭС | ВЭС |
| Номинальная мощность ЭС, МВт | 100 | 183.33 |
| $K_{инм}, \%$ | 55 | 30 |
| Присоединение к сети, млн. € | -10.05 | -18.33 |
| Капитальные затраты, млн. € | -126.7 | -304.4 |
| Затраты на эксплуатацию, млн. € | -136.1 | -140.6 |
| Затраты на газ, млн. € | -319.6 | 0 |
| Экспортная цена газа, млн. € | | 343.9 |
| Экоштраф за выброс CO ₂ , млн. € | -81.4 | 0 |
| Выручка за ЭлЭн, млн. € | 347.7 | 347.7 |
| Баланс расходов и выручки, млн. € | -244.8 | -115.7 |
| Себестоимость ЭлЭн ЭС, €/кВт·ч | 0.067 | 0.052 |
| Топливная составляющая, % | 52.1 | 0 |
| купаемость по цене замещ.газа, лет | нет | 10.2 |

ВЭС от ГаЭС

- меньший $K_{иум}$ (30% против 55%)
- большие капзатраты (в 2,5 раза)
- безтопливность (стоимость газа для ГазЭС при равнодоходных ценах газа $\approx 170 \text{ €/т}$ к 2013 г. = при расх. 200 Г/кВт·ч > капзатрат на ВЭС)
- отсутствие экоштрафа ($\approx 25\%$ от цены газа)

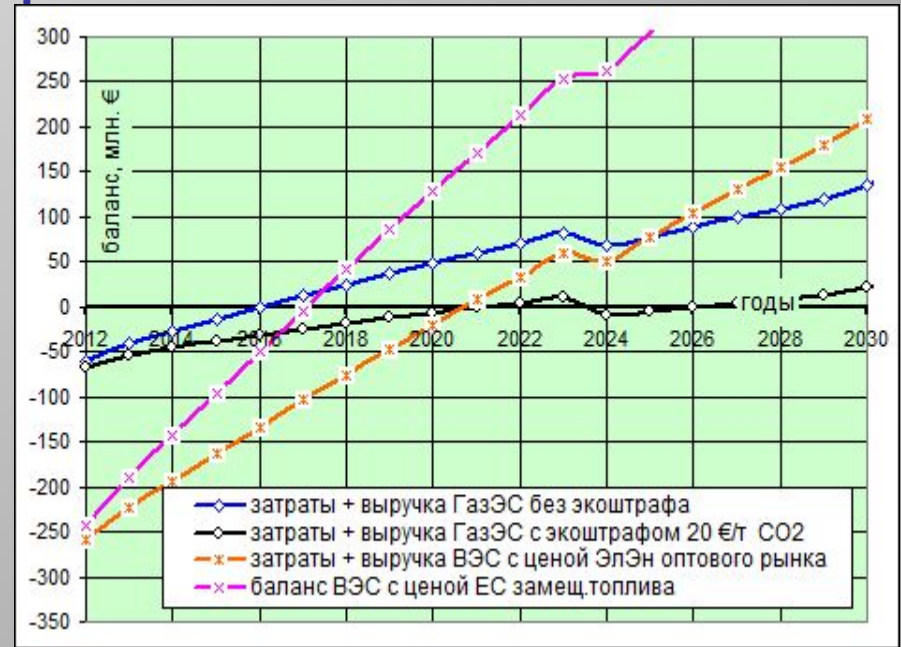
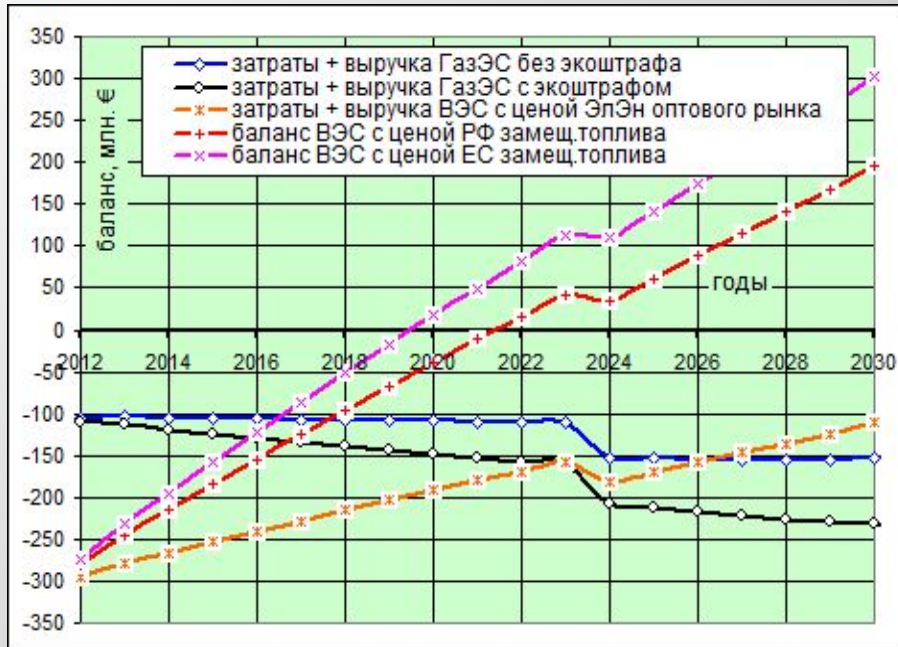
По расчетам: себестоимость ЭлЭн ВЭС ниже чем у ГазЭС (52 €/МВт·ч против 67 €/МВт·ч). При

закупке ЭлЭн ВЭС и ГазЭС по ценам оптового рынка России ($\approx 35 \text{ €/МВт·ч}$) ВЭС и ГазЭС не окупаемы. Новые ГазЭС окупятся при цене ЭлЭн $\approx 70 \text{ €/МВт·ч}$



Слайд 30.

Сравнения экономических показателей ВЭС и ГазЭС в России и странах ЕС

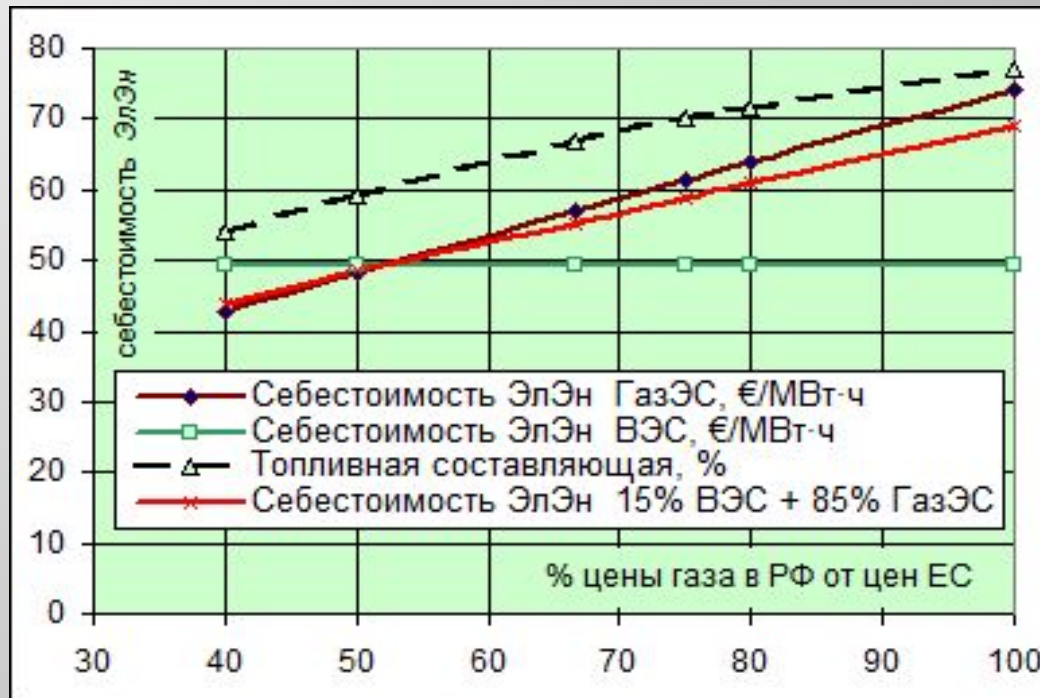


► В отсутствии в настоящее время массового строительства новых тепловых ЭС цены на ЭлЭн на оптовом рынке в России ($\approx 30 - 35 \text{ €/МВт}\cdot\text{ч}$) определяют старые ЭС (давно амортизированные), составляющие основную часть энергопарка России => отсутствие строительства новых ЭС.

► Окупаемость тепловых станций в странах ЕС достигается за счет меньших капзатрат ($600 - 700 \text{ €/кВтч}$), больших цен оптового рынка ($60 - 70 \text{ €/МВт}\cdot\text{ч}$) и скрытых субсидий тепловой генерации

Слайд 31.

Сравнения себестоимости электроэнергии $C_{\text{элЭн}}$ ВЭС и ГазЭС



- С ростом цен на газ с сегодняшних до равнодоходных себестоимость электроэнергии ГазЭС будет расти с 40 до 57 – 65 €/МВт·ч, а у ВЭС она сохраняется ≤ 50 €/МВт·ч при $K_{\text{иум}} = 30\%$
- Таким образом, замена части ГазЭС на ВЭС – способ снижения себестоимости выработки электроэнергии в стране и => тарифов
- Эффект снижения себестоимости электроэнергии в стране растет с увеличением доли ВЭС

Оценка производственных возможностей и темпов развития отрасли ВЭС

Технологические ограничения темпов ввода ВЭС



И опыт:

ке Государств доли ВЭС

нерации стран

- 13%

я

ет

ития мировых

ся

ия)

ВЭС

13,8 ГВт

вития

ВЭС в РФ выбраны в Проекте

с учетом технологических, экономических и кадровых ограничений и мирового опыта и соответствуют умеренным темпам развития ВЭ в Индии и Испании

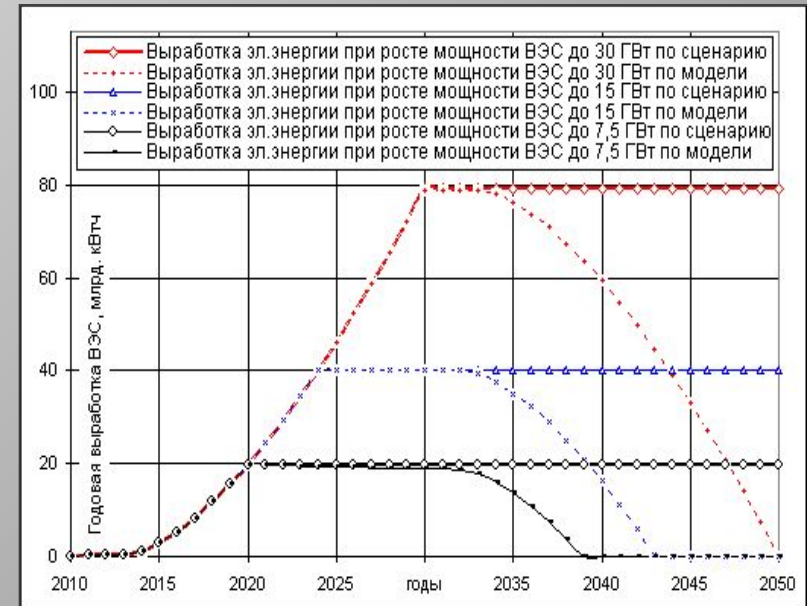
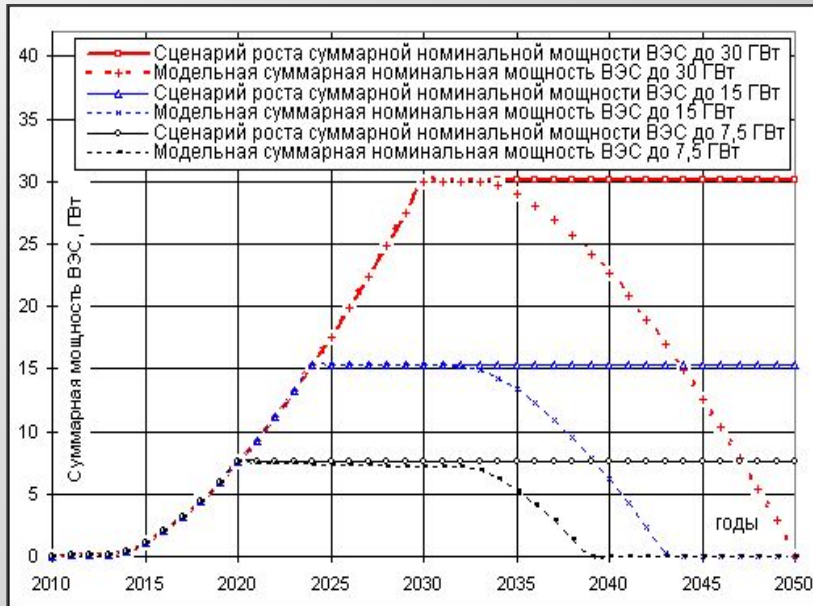
Слайд 33.

Проект широкомасштабного развития ВЭН в России

- Рост установленной мощности и выработки электроэнергии ВЭС в РФ

Мощность, ГВт

Выработка, млрд. кВтч



Не меньше, так как теряем возможности

- ▶ выполнения Распоряжения р-1 98.01.09
- ▶ быстрого роста выработки дешевой энергии
- ▶ сдерживания тарифов на энергию
- ▶ снижения выбросов CO₂
- ▶ экономии органического топлива
- ▶ увеличения прибыли от экспорта топлива
- ▶ в инновационном развитии

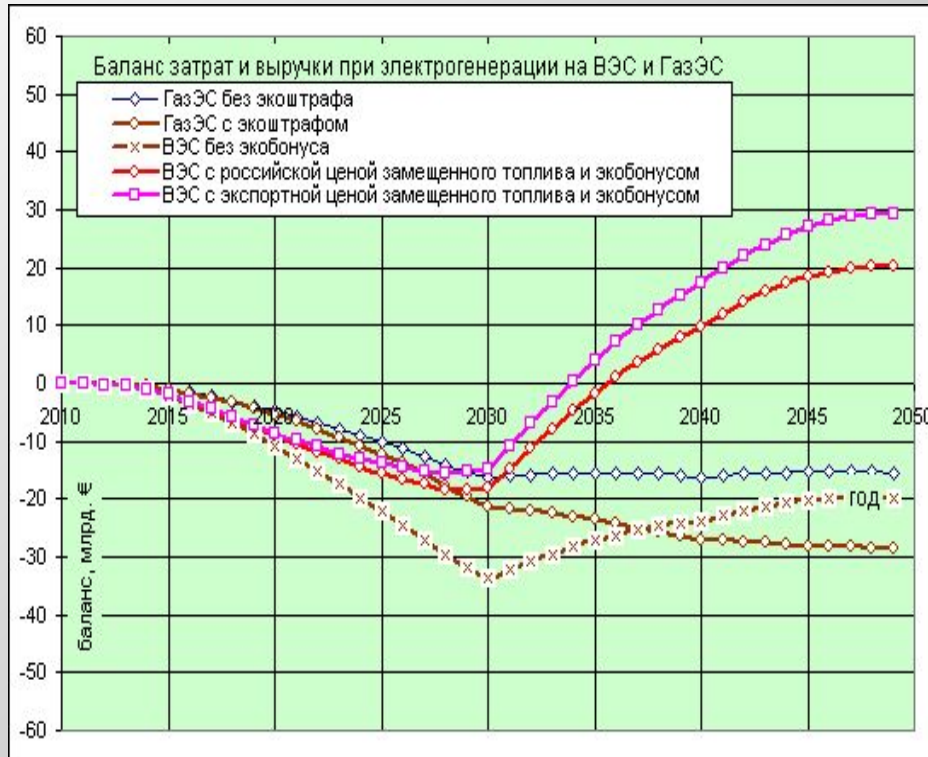
То есть: **ЧЕМ БОЛЬШЕ, ТЕМ ВЫГОДНЕЕ**

Не больше, так как не хватит

- ▶ политической воли Государства
- ▶ времени
- ▶ финансирования
- ▶ специалистов
- ▶ мощностей производства ВЭУ
- ▶ ветровых ресурсов и земли
- ▶ надежности электрических сетей

P. S.: **МОЖЕТ НЕ ХВАТИТЬ** и на 7 ГВт

Слайд 34 Накопление за 40 лет доходов, расходов и балансов при реализации проектов ВЭС 30 ГВт ($K_{иум} = 30\%$) и ГазЭС 18 ГВт ($K_{иум} = 50\%$) к 2030г. при “равнодоходном” сценарии



ртной выручкой газ

льный баланс
 гь до минимума
 будет нарастать,
 ные деньги !)
 ≈ 40 млрд.€)

ВЭС с российской выручкой газ

льный баланс
 гь до минимума
 нарастая к 2036 г.
 инные деньги !)
 т ≈ 17 млрд.€)

- В случае ВЭС – источник погашения отрицательного баланса – распределение прибыли от экспорта газа
- О надбавках !!! . ”Справедливая” надбавка за эл.энергию ВЭС = российской цене замещенного газа, действующая весь срок службы ВЭС (≈20 лет): позволяет окупить ВЭС за 11 – 13 лет и заставляет “хозяина” ВЭС максимально использовать ее технические возможности и ресурс.

Энергетический, экологический, экономический, социальный эффекты проекта 30 ГВт

| | 2020 г. | 2030 г. |
|--|-----------------------|------------------------|
| • Суммарная мощность ВЭС | 7 ГВт | 30 ГВт |
| $K_{\text{иум}}$ ВЭУ | 28% | 30% |
| Годовая выработка электроэнергии | 17,5 ТВт·ч | 79 ТВт·ч |
| Доля в балансе электроэнергии | 1,3% | 4,6% |
| Замещение газа | 6 млрд.м ³ | 27 млрд.м ³ |
| Стоимость замещенного газа в РФ сегодня | 440 млн.€ | 2,0 млрд.€ |
| Стоимость замещенного газа в России | 800 млн.€ | 3,6 млрд.€ |
| Экспортная стоимость замещенного газа | 1,5 млрд.€ | 6,8 млрд.€ |
| Сокращение выбросов CO ₂ | 9,6 млн.т | 43,5 млн.т |
| Стоимость выбросов CO ₂ (по 20 €/т) | 192 млн.€ | 870 млн.€ |

В силу экономической заинтересованности в долгосрочной перспективе основную организационную и финансовую роль в создании отрасли ВИЭ должны сыграть Государство и крупные компаниями ТЭК, добывающие и экспортирующие топливо, и прежде всего такие, как ГАЗПРОМ, ЛУКОЙЛ и др.

Слайд 36

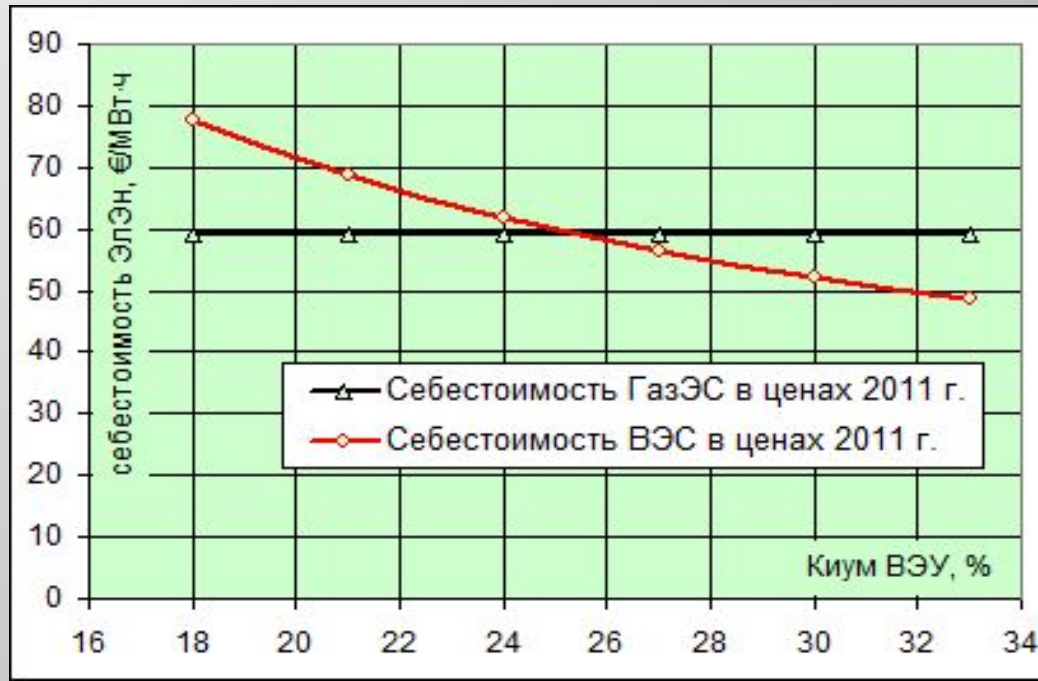
Разработка проекта Генсхемы размещения ВЭС в России

В качестве принципов и критериев предлагается:

- 1) ВЭС строить в местах потребления энергии и ее дефицита
(большинство субъектов Российской Федерации)
- 2) ВЭС строить в технологически допустимых количествах и темпе
(20% от мощности выработки субъекта РФ и соседних с ним)
- 3) планировать рост мощностей ВЭС с учетом мировой практики
- 4) ВЭС строить там, где они экономически выгоднее прочих ЭС
- 5) ВЭС строить в местах развитой дорожной и сетевой
инфраструктурой
- 5) ВЭС строить в местах, обеспеченных достаточными ВЭР
(ориентация на посевные площади в степных зонах в лесополосах)

Слайд 37.

ВЭС экономически выгоднее ГазЭС при $K_{иум} > 30\%$ (с запасом $\approx 20\%$!)



По Генеральной схеме ВЭС строим в местах, обеспеченных ВЭР ($K_{иум} > 30\%$)

$$K_{иум} = P_{расп} / P_{ном}, \quad \text{где} \quad P_{расп} = K_{неид} \cdot K_{тг}(n) \cdot \int_{V_0}^{V_{бур}} p(V) \cdot f(V) dV, \quad \text{где}$$

$P_{расп}$ и $P_{ном}$ – располагаемая и номинальная мощность ВЭУ; $K_{неид}$ и $K_{тг}(n)$ – коэффициенты неидеальности и технической готовности ВЭУ и n – номер года эксплуатации ВЭУ; $p(V)$ и $f(V)$ – рабочая характеристика и функция плотности вероятности распределения скорости ветра; $V_{бур}$ и V_0 – скорости бурового отключения и страгивания ВЭУ.

Слайд 38. Перспективные районы и возможные объемы использования ВЭС в РФ до 2020 г.

| № | Субъекты Российской Федерации | Место возведения ВЭС | Установленная мощность ВЭС, МВт |
|---------------------------|-------------------------------|---|---------------------------------|
| Центральный АО | | | |
| 1 | Белгородская область | Степные районы | 100 |
| 2 | Брянская область | Вдоль ж.д Брянск – Гомель | 100 |
| 3 | Воронежская область | Вдоль ж.д Воронеж – Ростов | 50 |
| 4 | Калужская область | Вдоль трассы Калуга – Сухиничи | 200 |
| 5 | Курская область | Окресности г. Курск | 100 |
| 6 | Московская область | Дмитровский район | 100 |
| 7 | Смоленская область | Район Смоленска | 200 |
| 8 | Тверская область | Район г. Бологое | 150 |
| ИТОГО | | | 1000 |
| Северо-Западный АО | | | |
| 1 | Архангельская область | Побережья Баренцева и Белого морей | 150 |
| 2 | Калининградская область | Висленская коса, побережье Балтики | 200 |
| 3 | Республика Коми | Побережье Баренцева моря | 100 |
| 4 | Ленинградская область | Побережье Балтийского моря | 300 |
| 5 | Мурманская область | Побережья Баренцева и Белого морей | 600 |
| 6 | Ненецкий АО | Побережье Баренцева моря | 50 |
| 7 | Республика Карелия | Побережье и о-ва Белого моря, Валаам | 100 |
| ИТОГО | | | 1500 |
| Южный АО | | | |
| 1 | Астраханская область | Прикаспийские районы | 200 |
| 2 | Волгоградская область | Р-н Волжской ГЭС, Камышин, побережье Цимлянского моря | 600 |
| 3 | Республика Кабардино-Балкария | Север республики | 50 |
| 4 | Республика Калмыкия | Побережье Каспийского моря, Элиста | 200 |
| 5 | Республика Карачаево-Черкесия | Север республики | 50 |
| 6 | Краснодарский край | Побережье Азовского и Черного морей | 600 |
| 7 | Ростовская область | Побережье Азовского моря | 200 |
| 8 | Ставропольский край | Армавирский коридор | 150 |
| ИТОГО | | | 2050 |

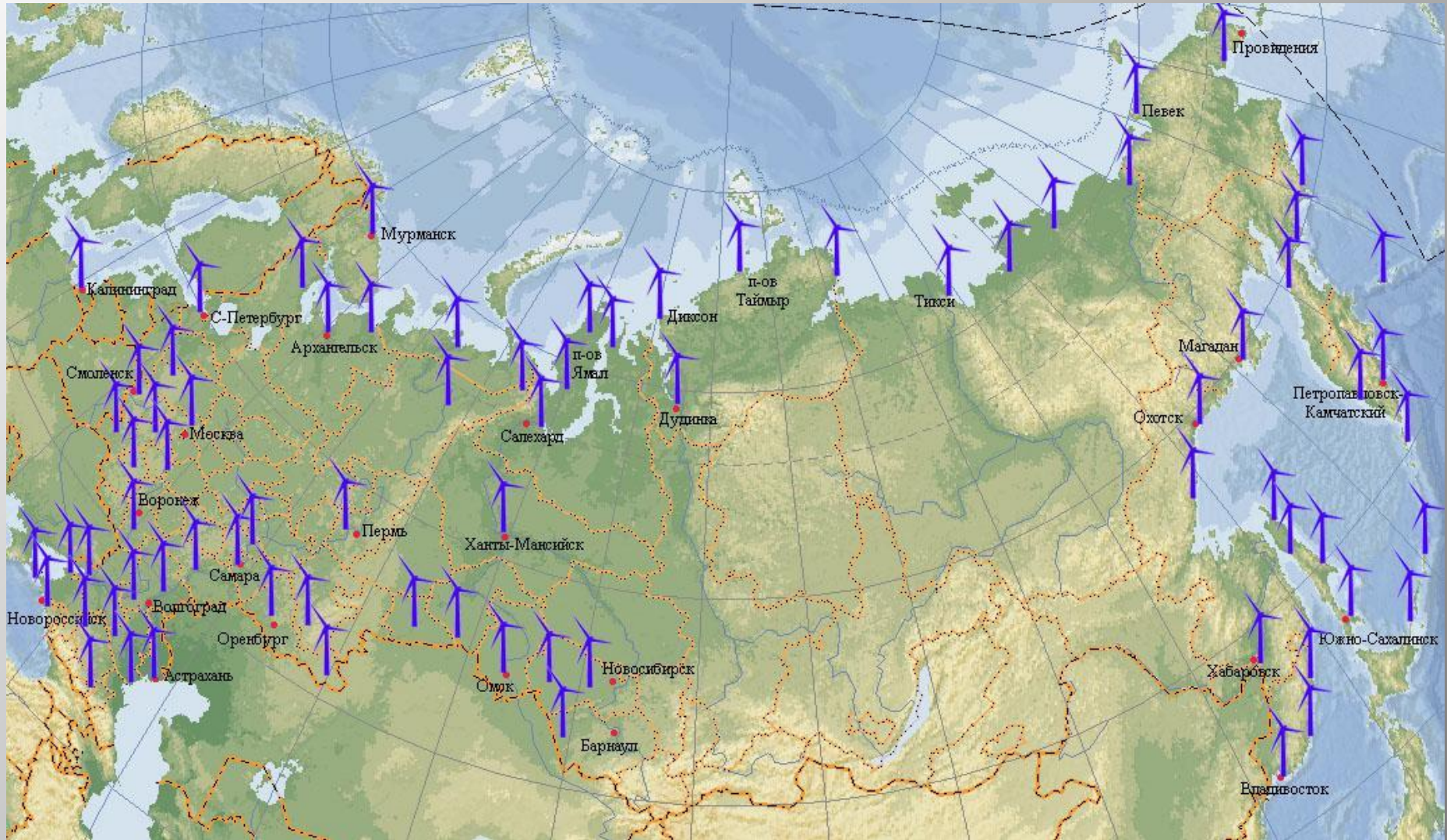
Слайд 39.

Перспективные районы размещения ВЭС (предложение к Генсхеме размещения ВЭС РФ).

| Приволжский АО | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| Республика Башкортостан | Южные степные районы | 50 |
| Оренбургская область | Южные степные районы | 100 |
| Пермский край | Безлесные районы | 150 |
| Самарская область | Побережье Куйбышевского вдхр. | 100 |
| Саратовская область | Побережье Саратовского вдхр. | 150 |
| Ульяновская область | Побережье Куйбышевского вдхр. | 100 |
| ИТОГО | | 650 |
| Уральский АО | | |
| Курганская область | Вдоль Западно-Сибирской ж.д. | 200 |
| Ямало-Ненецкий АО | В местах добычи газа | 400 |
| ИТОГО | | 600 |
| Сибирский АО | | |
| Алтайский край | Кулундинская степь | 100 |
| Новосибирская (Барабинская степь) | Вдоль Западно-Сибирской ж.д. | 300 |
| Омская область | Вдоль Западно-Сибирской ж.д. | 400 |
| ИТОГО | | 800 |
| Дальневосточный АО | | |
| Камчатская область | Побережье Охотского и Берингова морей | 200 |
| Магаданская область | Побережье Охотского моря | 100 |
| Приморский край | Побережье Японского моря | 150 |
| Сахалинская область | Побережье, Курильские о-ва | 300 |
| ИТОГО | | 750 |
| ИТОГО по РФ | | 7 350 |

Слайд 40.

Перспективные районы размещения ВЭС (предложение к Генсхеме размещения крупных ВЭС в России).



Слайд 41.

Положения, выносимые на защиту:

1. Автором разработана методология и реализующая ее информационно-аналитическая и численная методика определения и анализа ВЭП и энергетической эффективности ВЭС известных типов в заданной месте или районе с погрешностью $< 12\text{--}15\%$ для равнинных и $18\text{--}24\%$ для сложных по рельефу и подстилающей поверхности территорий, что минимум вдвое точнее других известных аналитических методик. Методика близка по точности к требуемой за рубежом 10%-ной точности обоснования инвестиций проектов ВЭС (достигаемой с использованием экспериментальных и аналитических методов), но в 3–4 раза эффективнее зарубежных по затратам времени и средств.
2. Выбор определяющих энергетическую и экономическую эффективность ВЭС технических параметров и типов базовых ВЭУ, а также их использования в гибридных (ветро-дизельных, ветрокриогенных) должен производиться с учетом характеристик ВЭП, существенно меняющихся по территории РФ.
3. Результаты исследований, полученные с использованием разработанных автором методик, доказывают, что в России имеются все (за исключением правовой базы) необходимые ресурсные, технические, энергетические и экономические условия для широкомасштабного эффективного использования ВЭС. При этом:

Слайд 42.

Положения, выносимые на защиту:

3.1) технический ВЭП РФ превышает 11500 млрд кВт·ч/год (в 11,5 раз больше потребления *ЭлЭн* в стране), ВЭП Центрального, Северо-Западного, Приволжского и Южного ФО, где проживает 73% населения РФ, составляет не менее 3450 млрд кВт·ч/год;

3.2) энергетический потенциал ВЭС, вырабатывающих *ЭлЭн* с меньшей на 18-20% себестоимостью, чем наиболее экономичные в настоящее время ТЭС на газе, превышает 1100 млрд кВт·ч/год (больше современного потребления *ЭлЭн* в РФ);

3.3) с учетом установленных в работе технологических и производственных ограничений суммарные установленные мощности ВЭС в РФ к 2020 и 2030 годам могут составлять до 7 и 30 ГВт соответственно с годовой выработкой не менее 17,5 и 80–85 млрд кВт·ч/год с ее долей до 5–6% от потребления *ЭлЭн* в стране в 2030 г.

3.4) годовое замещение газа в РФ при работе ВЭС суммарной мощности 30 ГВт может составить 30–35 млрд м³ при сокращении выбросов в атмосферу CO₂ 40–50 млн т.

3.5) целесообразные масштабы эффективного использования ВЭС составляют: в ТЭК – до 30 ГВт, на транспорте – до 17 ГВт, в АПК – не менее 1,9 ГВт;

Спасибо за внимание.

Тел./факс: 8-499-744-41-63,

E-mail: atmograph@gmail.com