

Москва,
19 июня 2025 г.

Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» и «Гидроэлектростанции, гибридные энергетические комплексы и возобновляемые источники энергии» НП «НТС ЕЭС»

Секция по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН

Разработка системы автоматизированного расчета аэродинамического затенения ВЭС с учетом влияния различных факторов

Докладчики:

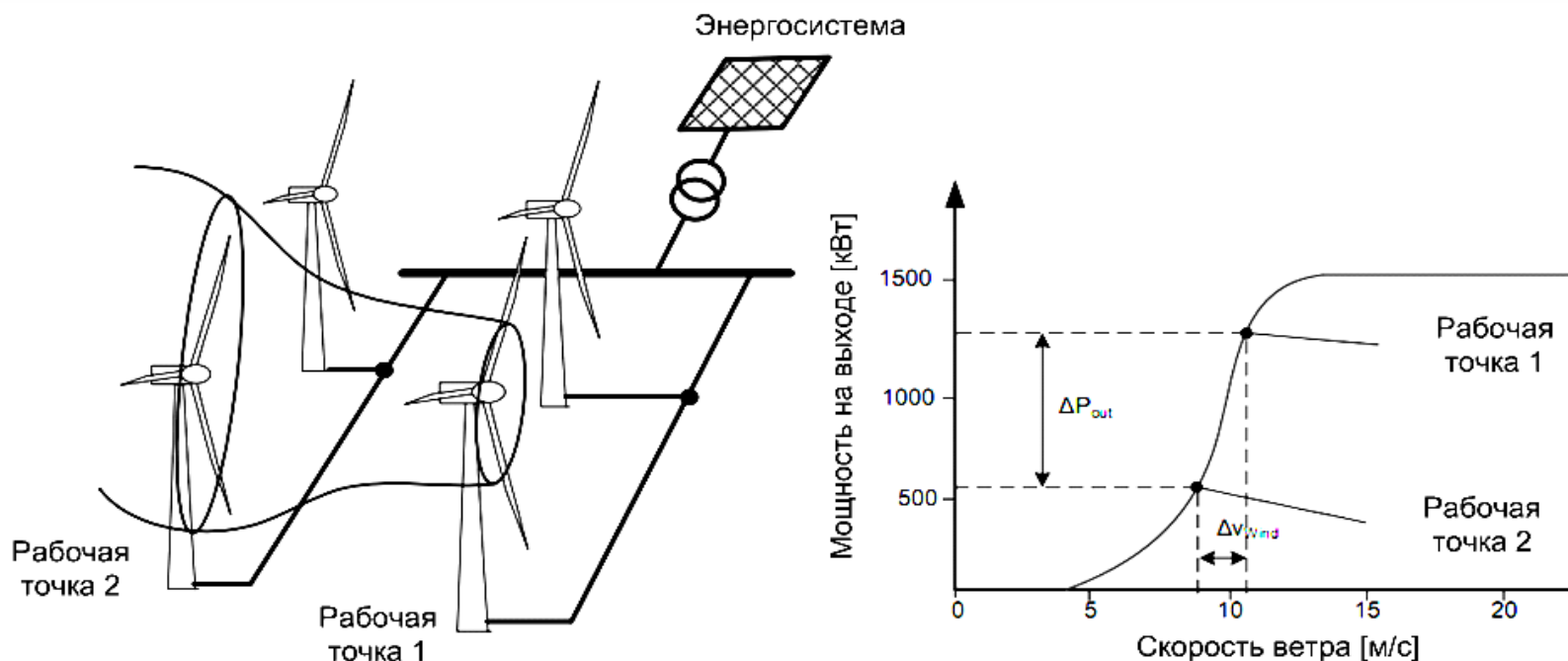
Игнатьев Евгений Витальевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» (ГВИЭ), НИУ «МЭИ»;

Корнев Дмитрий Александрович – директор Научно-исследовательского института проектирования (НИИП), НИУ МГСУ, (соискатель каф. ГВИЭ).

Введение: Аэродинамическое затенение в ветроэнергетике - Зачем его учитывать?

Что такое аэродинамическое затенение?

- После прохождения ветрового потока через ветровое колесо ВЭУ часть его кинетической энергии извлекается;
- За ветровым колесом ВЭУ формируется зона пониженной скорости ветра и повышенной турбулентности — спутная струя (wake);
- Подветренные ВЭУ работают в ухудшенных условиях при аэродинамическом затенении.



Введение: Аэродинамическое затенение в ветроэнергетике - Зачем его учитывать?



Почему это важно?

- **Снижение выработки электрической мощности:** потери на аэродинамическое затенение могут достигать 2–20% в год, особенно в плотных массивах ВЭУ (turbines in cluster);
- **Повышенная турбулентность:** увеличивает динамические нагрузки и механический износ ВЭУ;
- **Нарушение равномерности выработки по площадке:** несоответствие загрузки оборудования схемы электрических соединений ВЭС проектным режимам;
- **Влияние на прогнозирование выработки электрической мощности.**

В каких задачах критически важен учёт аэродинамического затенения?

1. На этапе проектирования (микросайтинг ВЭС):

- Оценка оптимального расположения ВЭУ для минимизации потерь на аэродинамическое затенение;
- Учитывается в расчёте годовой выработки (AEP).

2. В моделях прогнозирования выработки электрической мощности ВЭС: как физический блок в гибридных моделях прогнозирования генерации.

Моделирование аэродинамического затенения ВЭС — критически важный этап как при проектировании новых ВЭС, так и в повышении точности прогнозов выработки уже существующих ВЭС.

Основные аспекты моделирования аэродинамического затенения ВЭС



Моделирование аэродинамического затенения ВЭС состоит из:

- 1. Построение карты затенения (Wake Map):** формирование структуры с данными о том, какие ВЭУ влияют друг на друга при заданном направлении ветра;
- 2. Расчет входных скоростей ветра на ВЭУ:** вычисление скорости ветра на каждой i -й ВЭУ с учетом суммарного вклада аэродинамических потерь от спутных струй всех влияющих ВЭУ:
 - Данный расчет требует применения одной из нескольких моделей спутной струи (wind turbine wake):
 - Моделирование спутной струи требует применения моделей:
 - Сокращение скорости за плоскостью ветрового колеса ВЭУ определяется коэффициентом тяги ВЭУ – C_t ;
 - Форма спутной струи определяется влиянием шероховатости подстилающей поверхности (Z_0) и интенсивности турбулентности (I_0) (связанные характеристики).

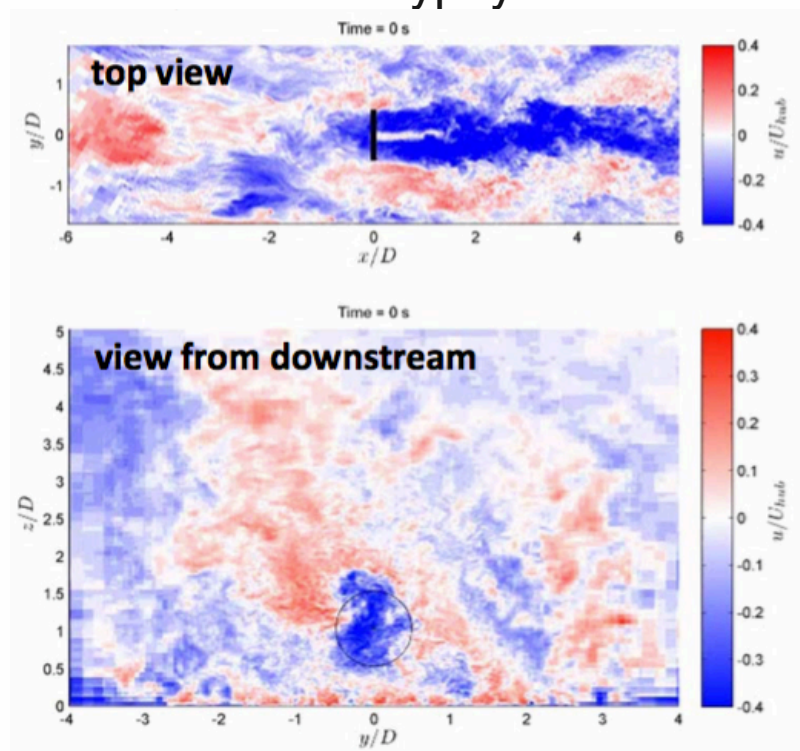
Обе задачи решаются с использованием большого объема расчетов итерационным методом и требуют программной реализации для надежного и удобного применения.

Моделирование спутной струи ВЭУ (Wind Turbine Wake)



Основные аспекты моделирования спутной струи:

- Ветровое колесо ВЭУ отбирает энергию из ветрового потока, создавая зону пониженной скорости ветра за ВЭУ – **спутную струю**.
- ВЭУ, затененная спутной струей, генерирует меньшую мощность из-за более низкой скорости набегающего на ВК ветрового потока и подвергается увеличенным аэродинамическим нагрузкам из-за повышенной турбулентности.



Спутная струя ВЭУ характеризуется:

- Сокращением скорости ветрового потока;
- Низкочастотные колебания;
- Прерывистый край;
- Турбулентность, создаваемая слоем сдвига.

Классификация моделей спутной струи ВЭУ



Точное моделирование спутной струи ВЭУ необходимо для оптимизации работы ВЭС и прогнозирования выработки электрической мощности ВЭС. Таким образом, важным аспектом моделирования является его цель, которая влияет на требуемые характеристики модели:

- **Прогнозирование мощности и годовая выработка энергии** — используются модели со стационарным потоком и усреднением по времени;
- **Оценка нагрузок** — используются модели с нестационарным потоком и высокой временной точностью;
- **Стратегии управления** — могут потребоваться как стационарные, так и нестационарные модели;
- **Фундаментальная физика** — используются максимально точные модели.

Иерархия моделей спутной струи ВЭУ



Тип модели	Пример модели
Эмпирическая	N.O. Jensen (1983) I. Katić (1986) (модели из программы PARK)
Линеаризированный RANS – (Reynolds – averaged Navier-Stokes)	J.F. Ainslie (1988) (модель вихревой вязкости) Ott et al. (2011) (модель Фуга)
Другие	Larsen et al. (1996) (модель динамического поведения струи)
Нелинейный RANS	k- ω модель замыкания с актуаторным диском, с полностью разрешённой линией
Симуляция больших вихрей Large-eddy simulation (LES)	Динамическая модель Смогоринского с актуаторным диском и линией

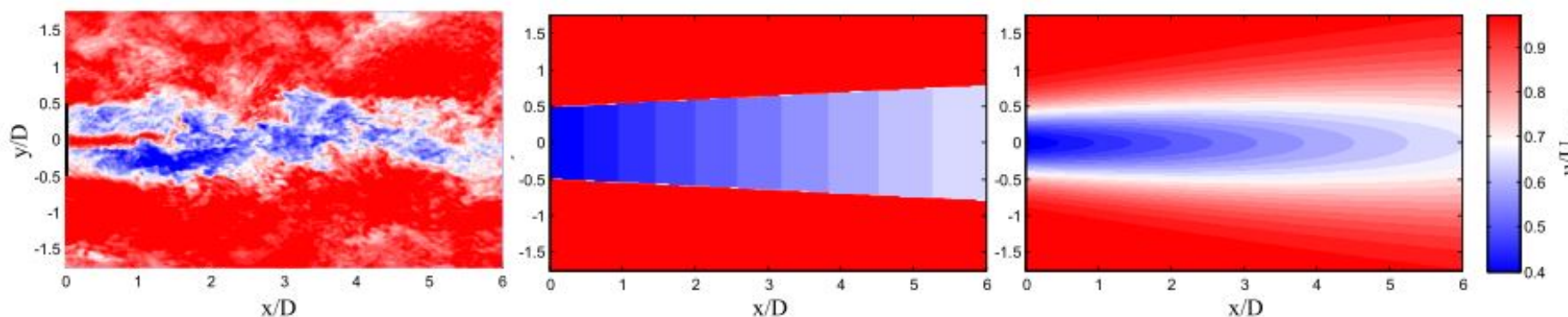
Надёжность модели

Модели спутной струи ВЭУ

Существует большое количество моделей спутной струи ВЭУ, используемых для моделирования аэродинамического затенения ВЭУ на площадке ВЭС:

Три наиболее популярных в инженерной практике модели:

- N.O. Jensen (1983)/I. Katić (1986) – PARK (эмпирическая модель);
- J.F. Ainslie (1985) – Eddy-viscosity model (линеаризованный RANS);
- G.C. Larsen (1996) – Смешанная модель динамического поведения струи.



Симуляция
методом больших
вихрей полного
нестабильного
потока за ВЭУ

PARK

Модель вихревой
вязкости

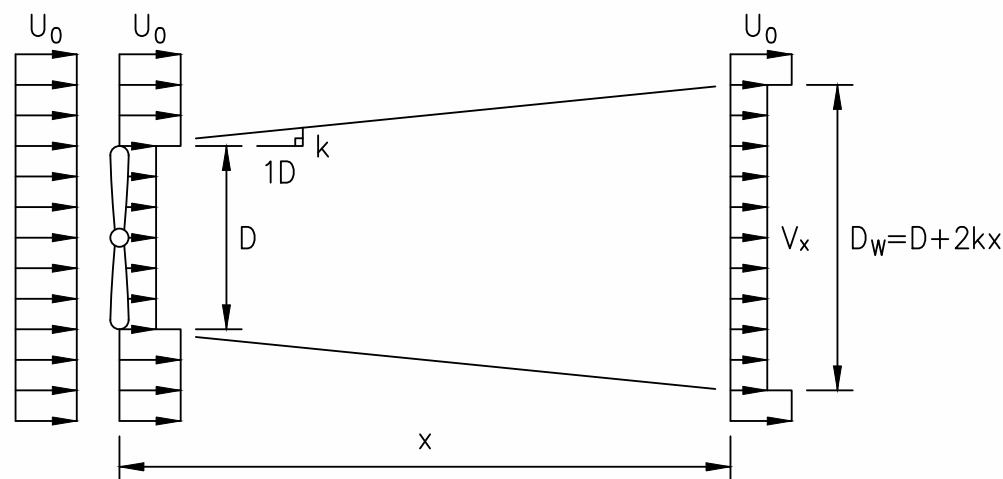
Модели спутной струи ВЭУ - N.O. Jensen



Модель спутной струи N.O. Jensen (1983):

Представляет собой модель единичной спутной струи, описываемой снижением скорости ветра на заданном расстоянии за плоскостью ветрового колеса ВЭУ в виде формулы:

$$1 - \frac{V_x}{U_0} = \frac{(1 - \sqrt{1 - C_t})}{\left(1 + \frac{2kx}{D}\right)^2},$$



Где:

x , м – заданное расстояние от плоскости вращения ВК ВЭУ;

U_0 , м/с – скорость невозмущенного ветрового потока перед плоскостью ВК ВЭУ;

V_x , м/с – скорость ветрового потока внутри спутной струи ВЭУ на расстоянии x , м от плоскости ВК ВЭУ; D , м – диаметр ВК ВЭУ; C_t – коэффициент тяги ВЭУ; k – коэффициент затухания ветрового потока.

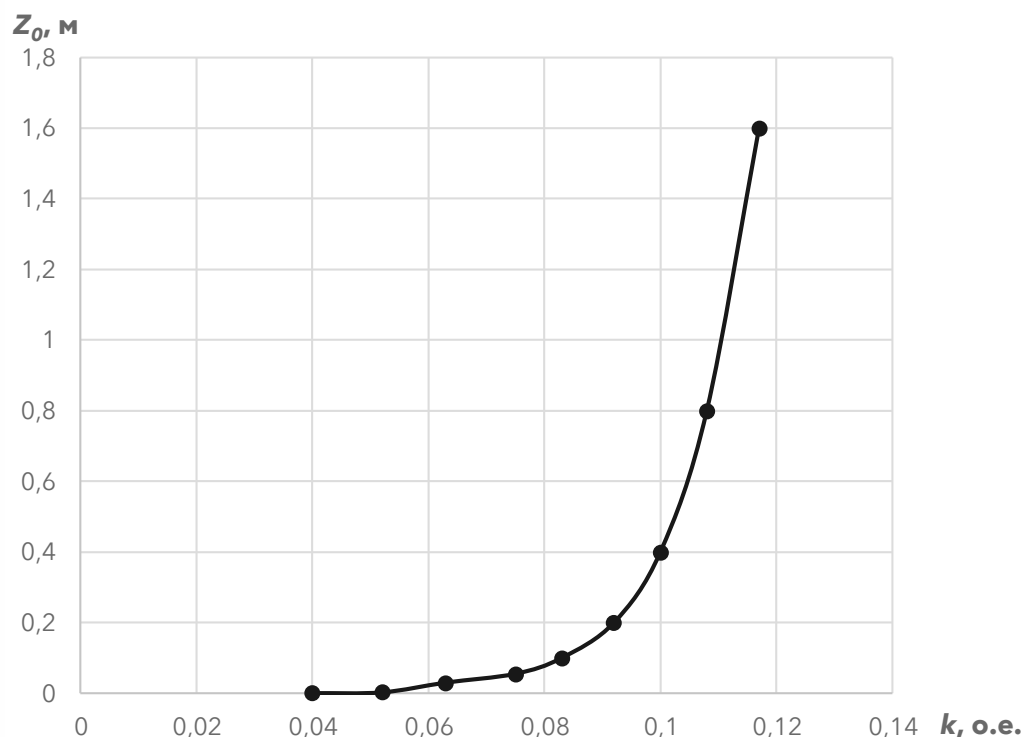
Источники: N.O. Jensen (1983). *A note on wind generator interaction*. Risø National Laboratory. Risø-M No. 2411

I. Katić, J. Højstrup & N.O. Jensen, *A Simple Model for Cluster Efficiency*, European Wind Energy Association, Conference and Exhibition, 7-9 October 1986, Rome, Italy.

Модели спутной струи ВЭУ - N.O. Jensen

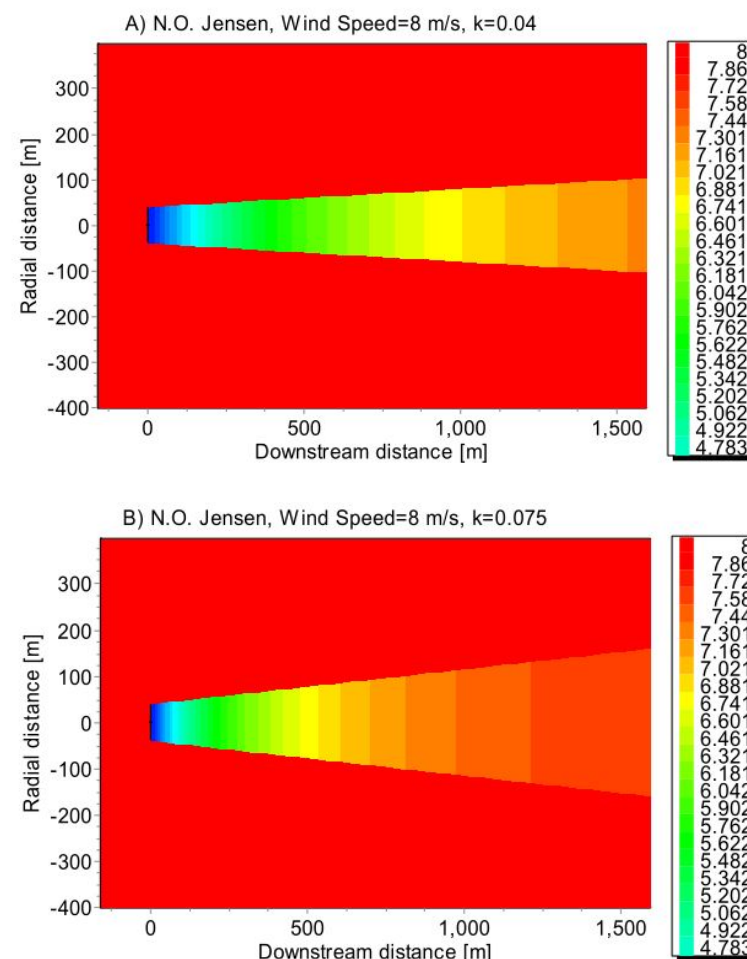


Коэффициент затухания спутной струи k :
зависит от величины шероховатости подстилающей поверхности на площадке размещения ВЭУ - Z_0 , м.



Источник: M.L. Thøgersen et al. *Introduction to Wind Turbine Wake Modelling and Wake Generated Turbulence*, EMD International A/S, 02-06-2023.

Пример расчета спутной струи в зависимости от значения k :



Модели спутной струи ВЭУ - I. Katić (Имплементация модели N.O. Jensen)



Модель спутной струи I. Katić (1986):

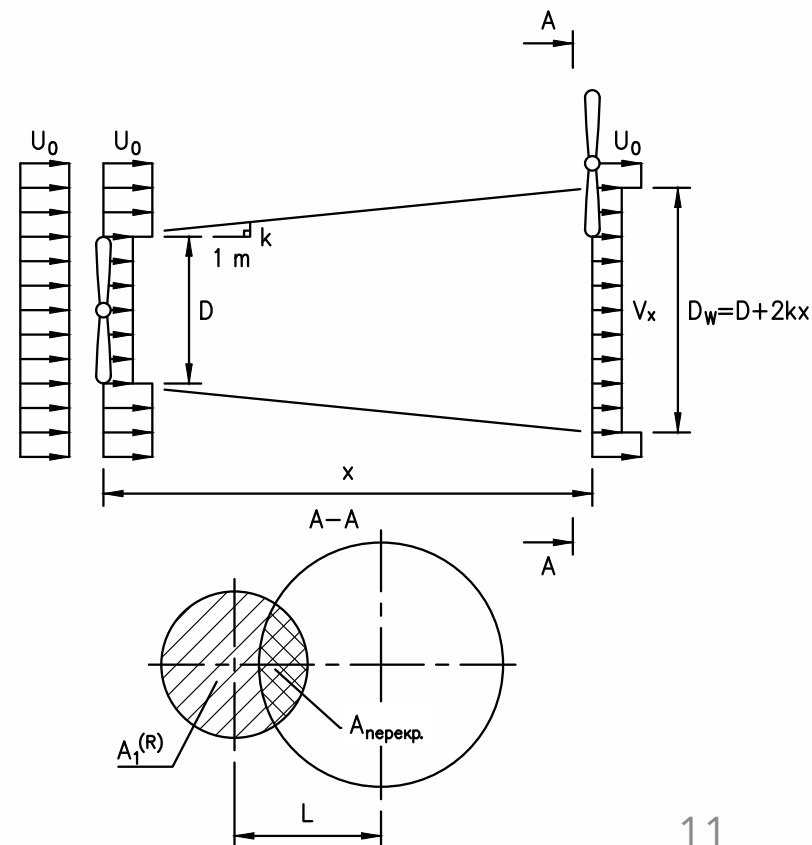
Является имплементацией модели спутной струи Н.О. Йенсена И. Катичем для её практического применения для расчетов аэродинамического затенения ВЭУ в составе ВЭС и заключается в добавлении учета перекрытия ометаемой площади затеняемой ВЭУ спутной струей затеняющей ВЭУ.

$$1 - \frac{V_x}{U_0} = (1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{D}{D + 2kx} \right)^2 \times \frac{A_{\text{перекр.}}}{A_1^{(R)}},$$

Где:

$A_{\text{перекр.}}$, м^2 – площадь перекрытия ометаемой площади затеняемой ВЭУ спутной струей затеняющей ВЭУ;

$A_1^{(R)}$, м^2 – ометаемая площадь затеняемой ВЭУ.



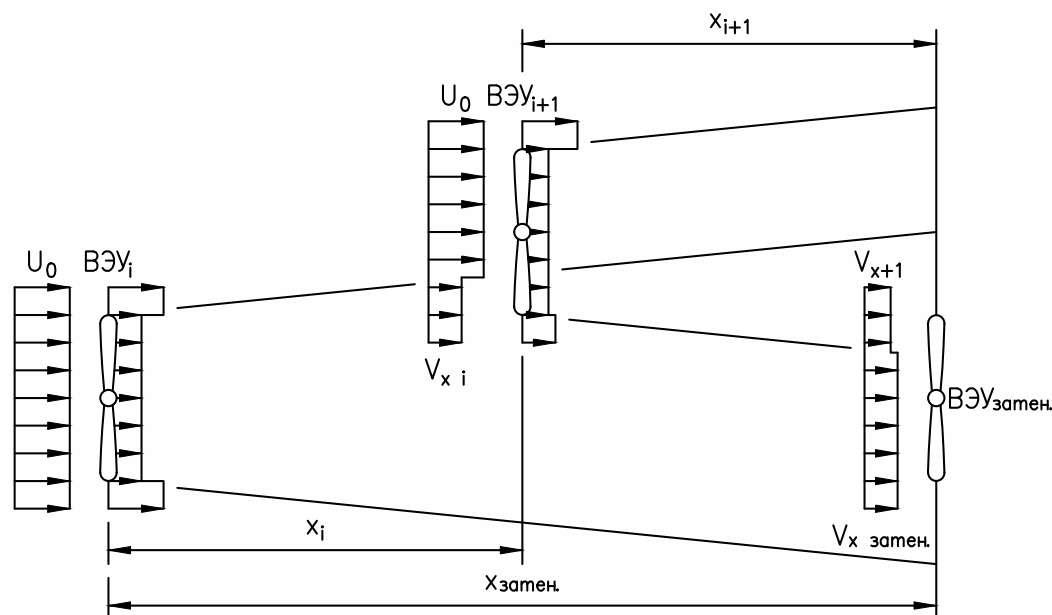
Модели спутной струи ВЭУ - I. Katić (Имплементация модели N.O. Jensen)



Доп. особенность модели И. Катича связана с учетом перекрытия спутной струей ометаемой площади рабочего колеса ВЭУ и расчетом режима аэродинамического затенения ВЭУ в ВЭС:

$$\delta V_n = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (\delta V_i)^2},$$

δV_n , м/с – сокращение скорости ветрового потока на заданном расстоянии x_i , м от плоскости ветрового колеса i -й затеняющей ВЭУ до плоскости ветрового колеса затеняемой ВЭУ.



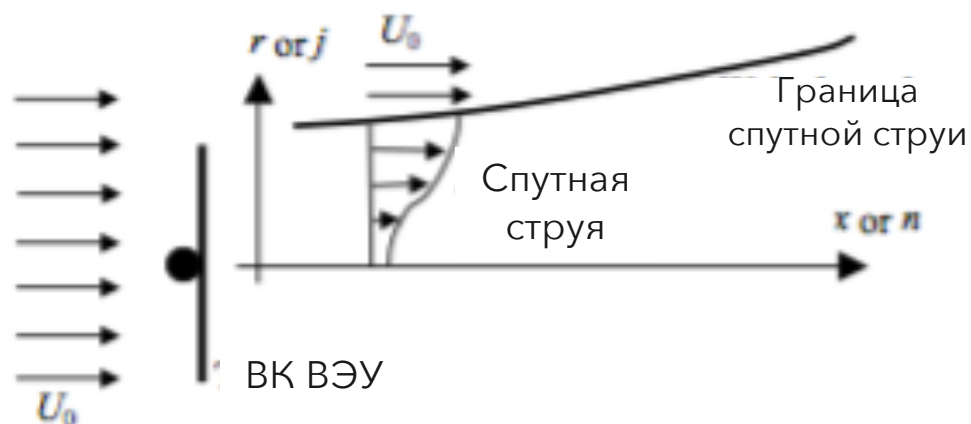
Использование подобного подхода значительно повышает точность расчета аэродинамического затенения ВЭУ, работающих в составе ВЭС.

Модели спутной струи ВЭУ - J.F. Ainslie

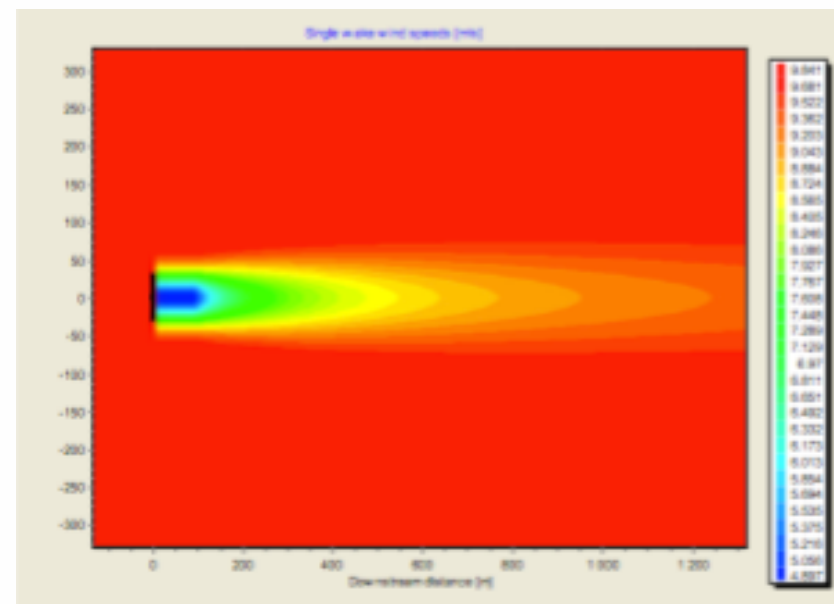


Модель спутной струи J.F. Ainslie (1988):

Представляет собой модель спутной струи, основанную на численном решении уравнений Навье-Стокса для турбулентного пограничного слоя и, которая приближается к физическим явлениям, наблюдаемым в ветровом следе.

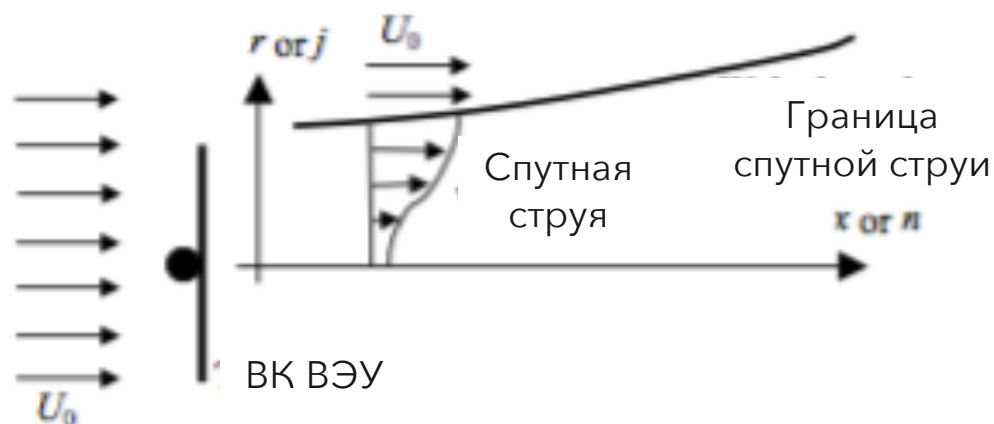


Источник: J.F. Ainslie. *Calculating the flowfield in the wake of wind turbines*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 27 (1988) 213-224.



Построение спутной струи по модели Дж.Ф. Эйнсли в горизонтальной плоскости за ВК ВЭУ

Модели спутной струи ВЭУ - J.F. Ainslie



Уравнение Навье-Стокса:

упрощается из уравнения в частных производных к дифференциальному уравнению

Осевая скорость:

$$\frac{d\tilde{U}_c}{d\tilde{x}} = 16\tilde{\epsilon} \frac{\tilde{U}_c^3 - \tilde{U}_c^2 - \tilde{U}_c + 1}{C_t \tilde{U}_c}$$

Решение переводится в безразмерную форму для упрощения решения:

$$\tilde{u} = \frac{u}{U_0}, \tilde{U}_c(x) = \frac{U_c(x)}{U_0}, \tilde{r} = \frac{r}{d}, \tilde{x} = \frac{x}{d}, \tilde{\epsilon} = \frac{\epsilon}{U_0 d}$$

Сокращение скорости определяется по формуле: $D_M(x) = 1 - \tilde{U}_c(x)$

Поле спутной струи рассчитывается с использованием формулы:

$\tilde{u}(\tilde{x}, \tilde{r}) = 1 - D_M(\tilde{x})e^{-3,56\tilde{r}^2/\tilde{b}^2}$, где b - ширина спутной струи, которая

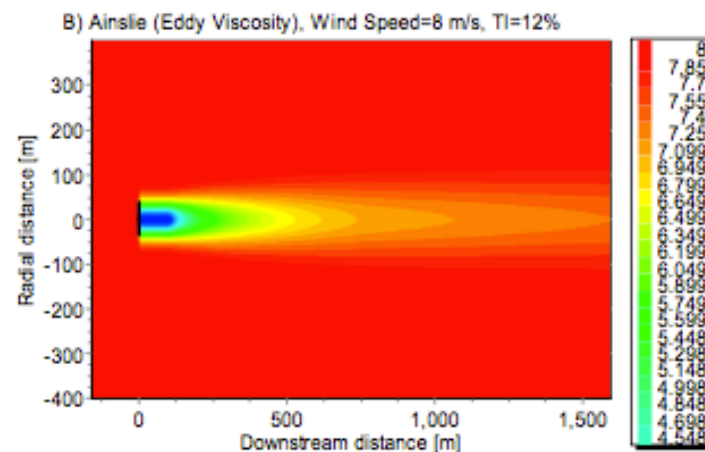
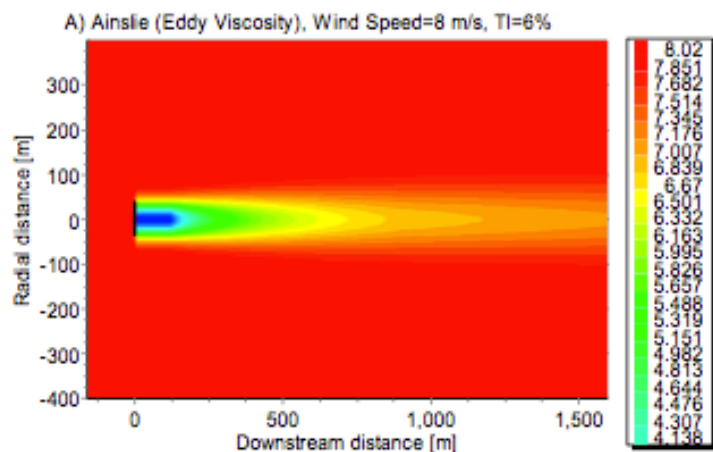
вычисляется по формуле: $b = \frac{3,56C_t}{8D_M(1-0,5)D_M}$

Решение уравнения Эйнсли имеет граничные условия (на расстоянии $2D_{ВК}$ от плоскости ВК ВЭУ): $D_M(\tilde{x} = 2) = C_t - 0,05 - (16C_t - 0,5)I_0/1000$

Модели спутной струи ВЭУ - J.F. Ainslie

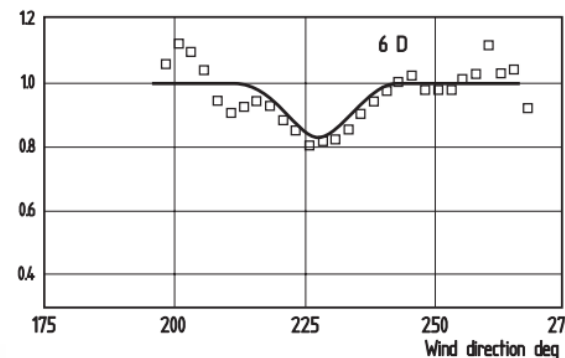
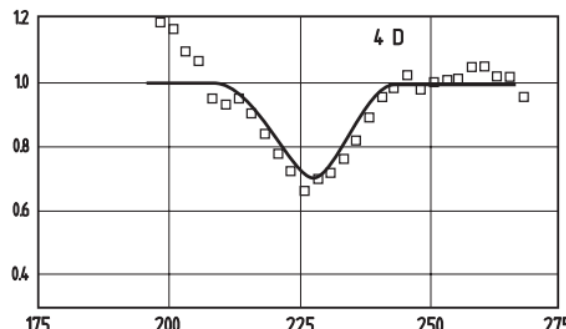
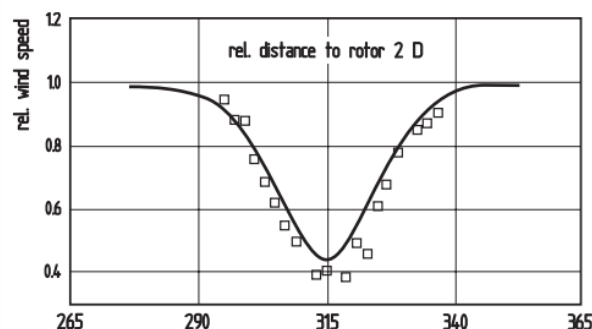


Изменение профиля спутной струи, смоделированной по модели Эйнсли:



Спутная струя при интенсивности турбулентности 6% имеет максимальное снижение скорости ветра на 0,5 м/с выше на дистанции 7D, чем при интенсивности турбулентности 12%.

Верификация определения профиля спутной струи по данным измерений на ВЭУ Enercon E-16 (в относительных единицах отн-но U_0):



Модели спутной струи ВЭУ - G.C. Larsen



Модель спутной струи G.C. Larsen (EWTS II) (1996):

Основана на решении уравнения турбулентного пограничного слоя Прандтля. Спутная струя является несжимаемой, стационарной и осесимметричной.

Уравнение снижения скорости в радиальной точке r на расстоянии x от плоскости ВК ВЭУ:

$$U_0 - V_x = -\frac{U_0}{9} (C_t A x^{-2})^{1/3} \left\{ r^{3/2} (3c_1^2 C_t A x)^{-1/2} - \left(\frac{35}{2\pi} \right)^{3/10} (3c_1^2)^{-1/5} \right\}^2,$$

Где:

U_0 - скорость невозмущенного ветрового потока; V_x - скорость ветрового потока в спутной струе в точке (r, x) ; A - ометаемая площадь ВК ВЭУ; c_1 - безразмерная длина смешивания.

Радиус спутной струи на расстоянии x от плоскости ВК ВЭУ рассчитывается как:

$$R_{\text{струи}} = \left[\frac{35}{2\pi} \right]^{1/5} [3c_1^2]^{1/5} [C_t A x]^{1/3}$$

Источник: G.C. Larsen, J.Højstrup, H.M. Aagaard. *Wind fields in wakes*, In A. Zervos, H. Ehmman, & P. Helm (Eds.), 1996 European Union wind energy conference. Proceedings (pp. 764-768).

Модели спутной струи ВЭУ - G.C. Larsen



Существует несколько подходов к расчету безразмерной длины смешивания c_1 :

В общем виде она рассчитывается как:

$c_1 = l(C_t Ax)^{-1/3}$, где l - длина смешивания Прандтля.

Ларсен предложил оценку в соответствии с уравнением (секция 5.1 доклада EWTS II):

$$c_1 = \left[\frac{105}{2\pi} \right]^{-1/2} \left[\sqrt{\frac{1 + 1/\sqrt{1 - C_t} D}{2}} \right]^{5/2} [C_t Ax_0]^{-5/6}$$

Где:

$x_0 = 9,5D / \left(\frac{2R_{9,5}}{D} \right)^3 - 1$ – аппроксимационный параметр;

$R_{9,5} = 0,5[R_{nb} + \min(h, R_{nb})]$ - эмпирическое граничное условие на расст. $9,5D$ от плоскости ВК ВЭУ (гарантируется, что минимальная интенсивность турбулентности равна 5%);

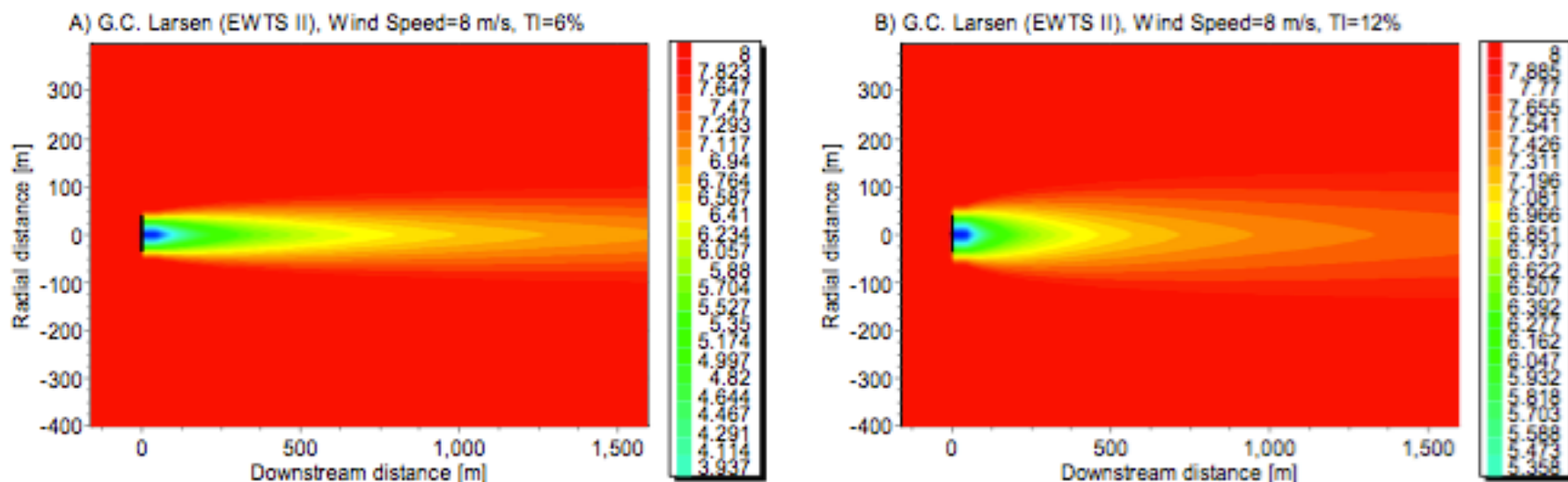
h - высота внутреннего пограничного слоя (зависит от шероховатости подстилающей поверхности Z_0 : $\frac{h}{Z_0} \left(\ln \frac{h}{Z_0} - 1 \right) = 0,9 \left(\frac{x}{Z_0} \right)$)

$R_{nb} = \max(1,08D; 1,08D + 21,7D(I_a - 0,05))$, где I_a - интенсивность турбулентности окружающей среды.

Модели спутной струи ВЭУ - G.C. Larsen



Изменение профиля спутной струи, смоделированной по модели Ларсена:



Спутная струя при интенсивности турбулентности 6% имеет максимальное снижение скорости ветра на 1 м/с выше на дистанции 7D, чем при интенсивности турбулентности 12%.

Модель Ларсена вдвое более чувствительна к изменению уровня турбулентности, чем модель Эйнсли. Также можно видеть, что в модели Ларсена расширение струи при интенсивности турбулентности 6% значительно ниже, чем при 12% по сравнению с моделью Эйнсли.

Имплементация моделей спутной струи ВЭУ – J.F. Ainslie и G.C. Larsen для расчетов



На настоящий момент сформулировано несколько подходов к имплементации моделей спутной струи J.F. Ainslie и G.C. Larsen для её практического применения для расчетов аэродинамического затенения ВЭУ в составе ВЭС:

- **Суперпозиция спутных струй (Wake Superposition):** при решении уравнения Навье-Стокса предполагается, что спутные струи ВЭУ развиваются независимо друг от друга. По методу [1] входная скорость ветрового потока для ВЭУ с учетом влияния нескольких спутных струй определяется как:

$$U = U_0 \max(D_{M,j}(r))$$

где U_0 - скорость невозмущенного ветрового потока; $D_{M,j}(r)$ - нормализованный профиль сокращения скорости в спутной струе j-ой ВЭУ на радиальном расстоянии r от оси струи

- **Метод mini-wake:** является продвинутым методом суперпозиции спутных струй, имеющим программную имплементацию в [2].

[1] M. Anderson, “Simplified Solution to the Eddy-Viscosity Wake Model,” 2009.

[2] J. Solvang, T. Young, P. Georgiou, C. Burge, P. Stuart, “mini-wake,” GitHub.
<https://github.com/resgroup/mini-wake>.

Имплементация моделей спутной струи ВЭУ – J.F. Ainslie и G.C. Larsen для расчетов



Расчет методом mini-wake выполняется в следующей последовательности:

1. Расчет сокращения скорости в спутной струе j-ой ВЭУ:

$$\delta U_j = D_{M,j}(r) = \Delta U_j \cdot \exp\left(-3,56 \cdot (r/b_j)^2\right)$$

где: ΔU_j - осевое сокращение скорости в струе; b_j - ширина спутной струи.

2. Суперпозиция сокращений скорости: применяется гибридный метод (по умолчанию):

$$\delta U_{comb} = 0,7 \cdot \sqrt{\sum_j \delta U_j^2} + 0,3 \cdot \sum_j \delta U_j$$

Метод учитывает как нелинейные (RSS), так и линейные эффекты наложения.

3. Интегрирование по ометаемой площади ветрового колеса ВЭУ (дискретизация по 12 точкам):

$$\delta \bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta U_{comb}(y_i, z_i)$$

4. Расчет входной скорости:

$$U_{in} = U_0 \cdot (1 - \delta \bar{U}),$$

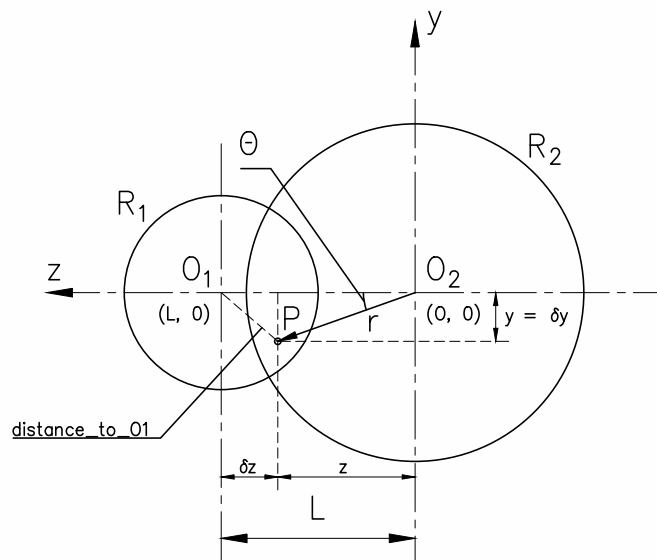
где U_0 - скорость невозмущенного ветрового потока.

Имплементация моделей спутной струи ВЭУ – J.F. Ainslie и G.C. Larsen для расчетов



Интегрирование по ометаемой площади ветрового колеса ВЭУ в методе **mini-wake** выполняется с фиксированной дискретизацией (12 точек), по всей ометаемой площади ВК независимо от того перекрыта ли она полностью или частично спутными струями j-х ВЭУ.

Для повышения точности метода **был разработан авторский метод**, использующий подход И. Катича (учет доли перекрытия ометаемой площади ВК ВЭУ затеняющей спутной струей) и интегрирование по площади перекрытия $A_{\text{перекр.}}$ по методу Монте-Карло:



1. Создается большое количество случайных точек P_i ;
2. Проводится проверка нахождения P_i внутри $A_{\text{перекр.}}$;
3. Для точек P_i , оказавшихся внутри $A_{\text{перекр.}}$, рассчитываются сокращения скорости $\delta U_j(r(P_i))$ где $(P_i \in A_{\text{перекр.}})_i$;
4. Рассчитывается среднее снижение скорости внутри $A_{\text{перекр.}}$: $\overline{\delta U_j(r(P_i))}$ где $(P_i \in A_{\text{перекр.}})$;
5. Суммарное снижение скорости от всех струй рассчитывается по формуле:
$$\delta V_n = \sqrt{\sum_{j=1}^{n-1} \left(\overline{\delta U_j(r(P_i))} \right)^2}$$

Модели турбулентности

В моделях спутной струи, основанных на решении уравнения Навье-Стокса (RANS) в качестве одного из расчетных параметров используется интенсивность турбулентности, которая состоит из двух составляющих:

- **Амбиентная турбулентность (Ambient turbulence):** интенсивность турбулентности в невозмущенном ветровом потоке;
- **Добавленная турбулентность (Added turbulence):** интенсивность турбулентности в спутной струе ВЭУ.

Общая интенсивность турбулентности рассчитывается как:

$$I_{total} = \sqrt{I_{ambient}^2 + I_{add}^2}$$

Где: $I_{ambient}$ – турбулентность окружающей среды: $I_{ambient} = A_x \cdot k \cdot \left[\frac{1}{\ln\left(\frac{H_6}{Z_0}\right)} \right]$,

Где: A_x - безразмерная величина (задаётся пользователем в диапазоне от 2,5 до 1,8); $k = 0,4$ - константа фон Кармана; H_6 – высота башни ВЭУ, м; Z_0 – шероховатость подстилающей поверхности, м.

$I_{add} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{W_i}^2}$ – добавленная турбулентность в рамках ВЭС.

Для общего случая, когда ВЭУ затеняется несколькими спутными струями с их

неполным перекрытием ометаемой площади: $I_{total} = \sqrt{I_{ambient}^2 + \sum_{i=1}^n \left(I_{W_i} \cdot \frac{A_{overlap}}{A} \right)^2}$

Модели турбулентности



Существует большое количество моделей добавленной турбулентности ВЭУ:

1. Датские рекомендации;
2. Модель Frandsen & DIBt;
3. Модель B. Lange;
4. **Модель D.C. Quarton & TNO Laboratory** – принимается как базовая модель турбулентности для модели спутной струи J.F. Ainslie;
5. **Модель G.C. Larsen** – принимается как базовая модель турбулентности для модели спутной струи G.C. Larsen.

Источники:

1. *Recommendation for the fulfillment of the requirements found in the technical criteria*, Danish Energy Agency, 1992;
2. S. Frandsen & M.L. Thøgersen, *Integrated Fatigue Loading for Wind Turbines in Wind Farms by Combining Ambient Turbulence and Wakes*, Wind Engineering, Volume 23, No. 6, 1999;
3. Lange, Bernard; H.P. Waldl; A.G. Guerrero; D. Heinemann & R.J. Barthelmie: *Modelling of Offshore Wind Turbine Wakes with the Wind Farm Program FLaP*, Wind Energy, 2003 6:87-104;
4. Quarton and Ainslie, *Turbulence in Wind Turbine Wakes*, Wind Engineering Vol 14 No 1;
5. G.C.Larsen, J. Højstrup, H.A. Madsen, *Wind Fields in Wakes*, EUWEC '96, Gothenburg, 1996.

Модели турбулентности

Модель D.C. Quarton & TNO Laboratory:

$$I_W = K_1 \cdot C_t^{\alpha_1} \cdot I_{ambient}^{\alpha_2} \cdot (X/X_n)^{\alpha_3}$$

где:

K_1 - коэффициент пропорциональности;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - коэффициенты степенной зависимости;

	K_1	α_1	α_2	α_3
Модель Quarton и Ainslie (оригинал)	4,80	0,70	0,68	-0,57
Модель Quarton и Ainslie (модифицир.)	5,70	0,70	0,68	-0,96
Голландская лаборатория TNO	1,31	0,70	0,68	-0,96

$I_{ambient}$ - AMBIENTная турбулентность;

X - осевое расстояние от плоскости ВК ВЭУ;

X_n - характерная длина струи:

$$X_n = \frac{\sqrt{0,212 + 0,145m}}{1 - \sqrt{0,212 + 0,145m}} \cdot \frac{1 - \sqrt{0,134 + 0,124m}}{\sqrt{0,134 + 0,124m}} \cdot X_h$$

где X_h - ближняя зона спутной струи.

Модели турбулентности

X_h - ближняя зона спутной струи рассчитывается как:

$$X_h = r_0[(a)^2 + (\lambda)^2 + (m)^2]^{-0,5}$$

где r_0 - эффективный радиус расширенного диска ВК ВЭУ:

$$r_0 = [D/2]\sqrt{(m+1)/2}$$

$$m = 1/\sqrt{1 - C_t}$$

Вклад других параметров оценивается как:

- Амбиентная турбулентность: $(a) = \begin{cases} 2,5I + 0,05 & \text{для } I \geq 0,02 \\ 5I & \text{для } I < 0,02 \end{cases}$

где I - амбиентная турбулентность.

- Генерируемая ВК ВЭУ турбулентность: $(\lambda) = 0,012 \cdot B\lambda$

где B - количество лопастей ВК ВЭУ;

λ - быстроходность ВК ВЭУ: $\lambda = \frac{\omega D}{2U_0}$.

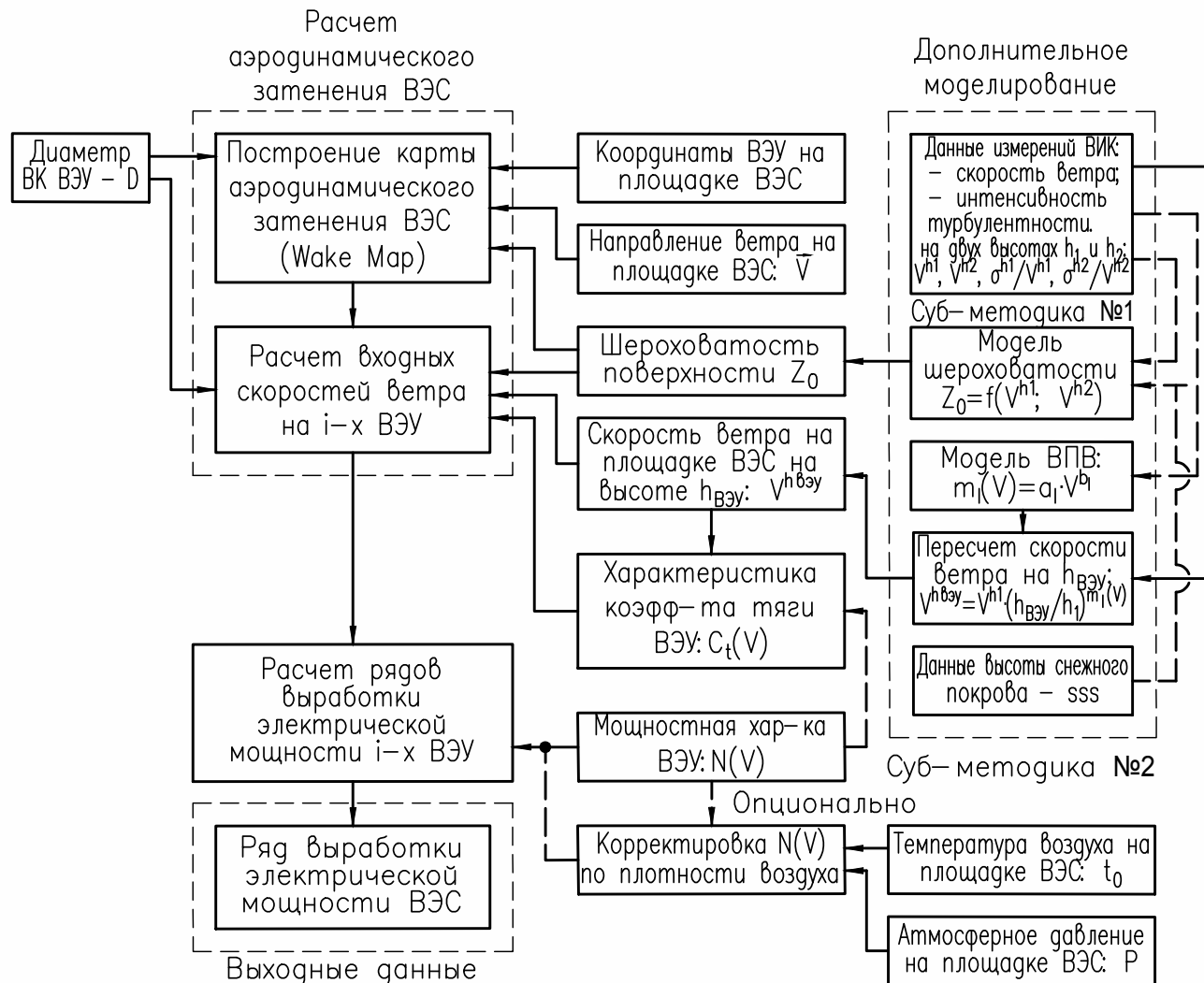
- Турбулентность, вызванная сдвигом: $(m) = [(1 - m)\sqrt{1,49 + m}]/(9,76(1 + m))$

Модель G.C. Larsen:

$I_W = 0,29 \cdot S^{-1/3} \sqrt{1 - \sqrt{1 - C_t}}$, где S - расстояние между затеняемой и затеняющей ВЭУ в диаметрах ветрового колеса.

Расчет выработки ВЭС с учетом аэродинамического затенения

Схема расчета выработки ВЭС с учетом аэродинамического затенения:



Расчет выработки ВЭС (ряд значений вырабатываемой электрической мощности - $N_i^{ВЭС}(t)$) с учетом аэродинамического затенения проводится с учетом особенностей используемой модели спутной струи (N.O. Jensen) и ее практической имплементации (модели I. Katić).

Построение карты аэродинамического затенения ВЭС (Wake Map)



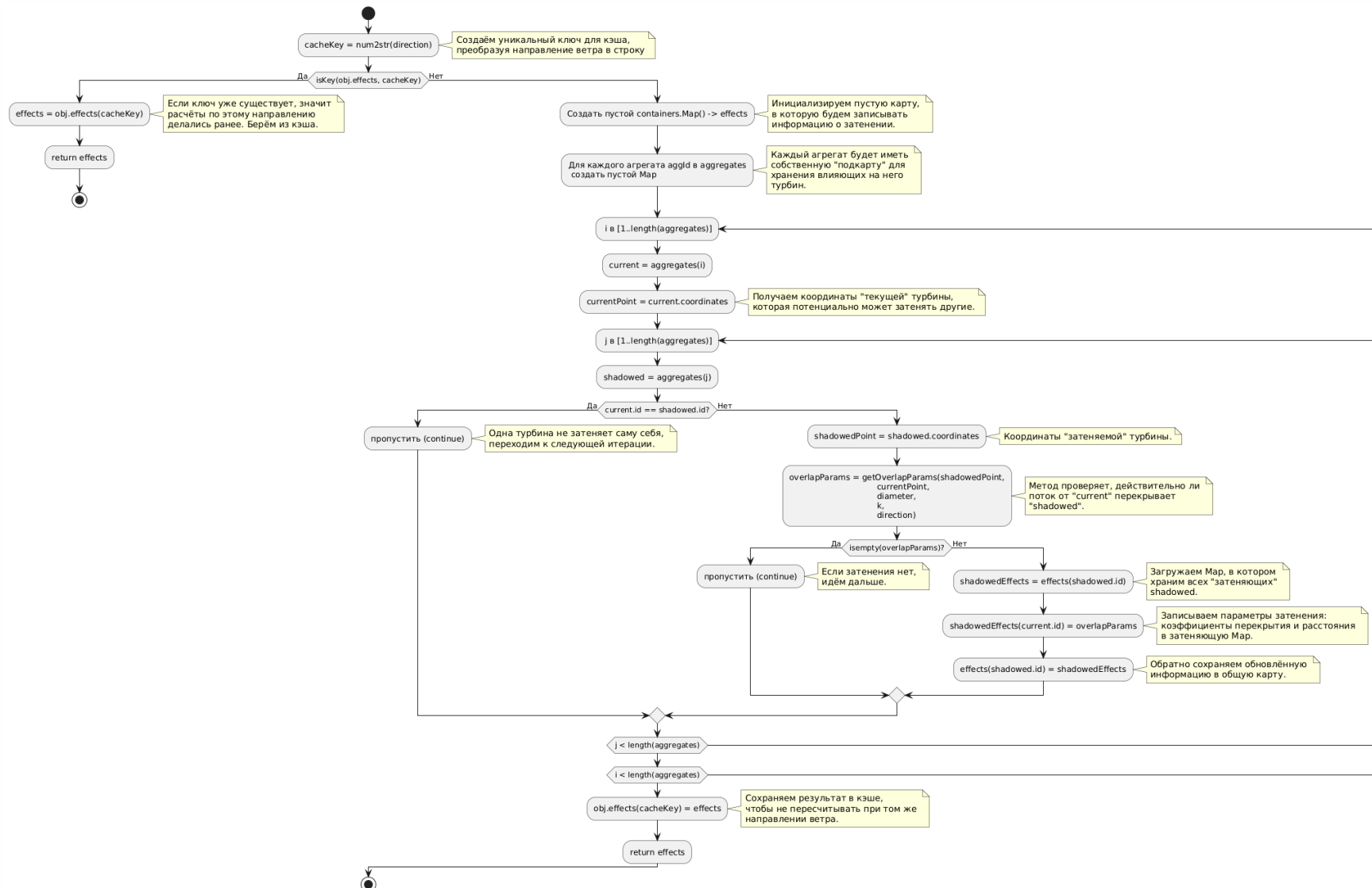
Построение карты аэродинамического затенения ВЭС (Wake Map) реализовано на основании трех функций «*getEffects()*», «*getOverlapParams()*» и «*circleOverlap()*» (формируют карту для каждого направления ветра (*windDir*) и рассчитывают степень перекрытия спутных струй от расположенных выше по потоку ВЭУ):

- **Функция «*getEffects()*»** - определяет наличие затенения ВЭУ. Для этого существует двойной цикл по всем парам ВЭУ (*i*, *j*): для текущей ВЭУ *current = aggregates(i)* проверяем, затеняет ли она ВЭУ *shadowed = aggregates(j)* в зависимости от *windDir*. Если *j = i*, то вызывается функция «*getOverlapParams()*».

Для повышения производительности вычислений при инициализации функции идет проверка кэша – если для данного *windDir* карта затенения была уже рассчитана раньше (хранится в свойстве *effects*), то возвращается готовая карта.

Построение карты аэродинамического затенения ВЭС (Wake Map)

Алгоритм функции «*getEffects()*», включающей «*getOverlapParams()*»:



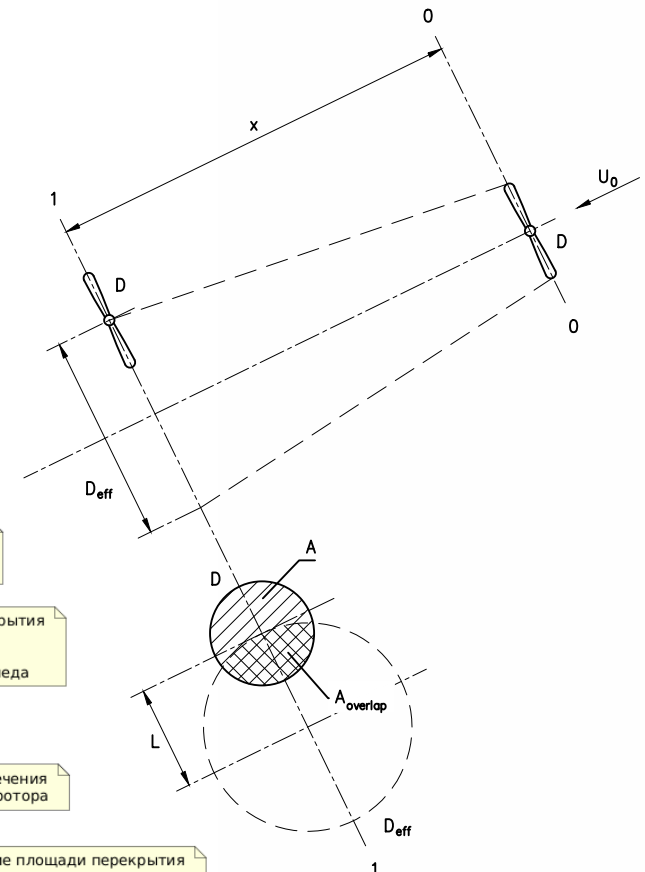
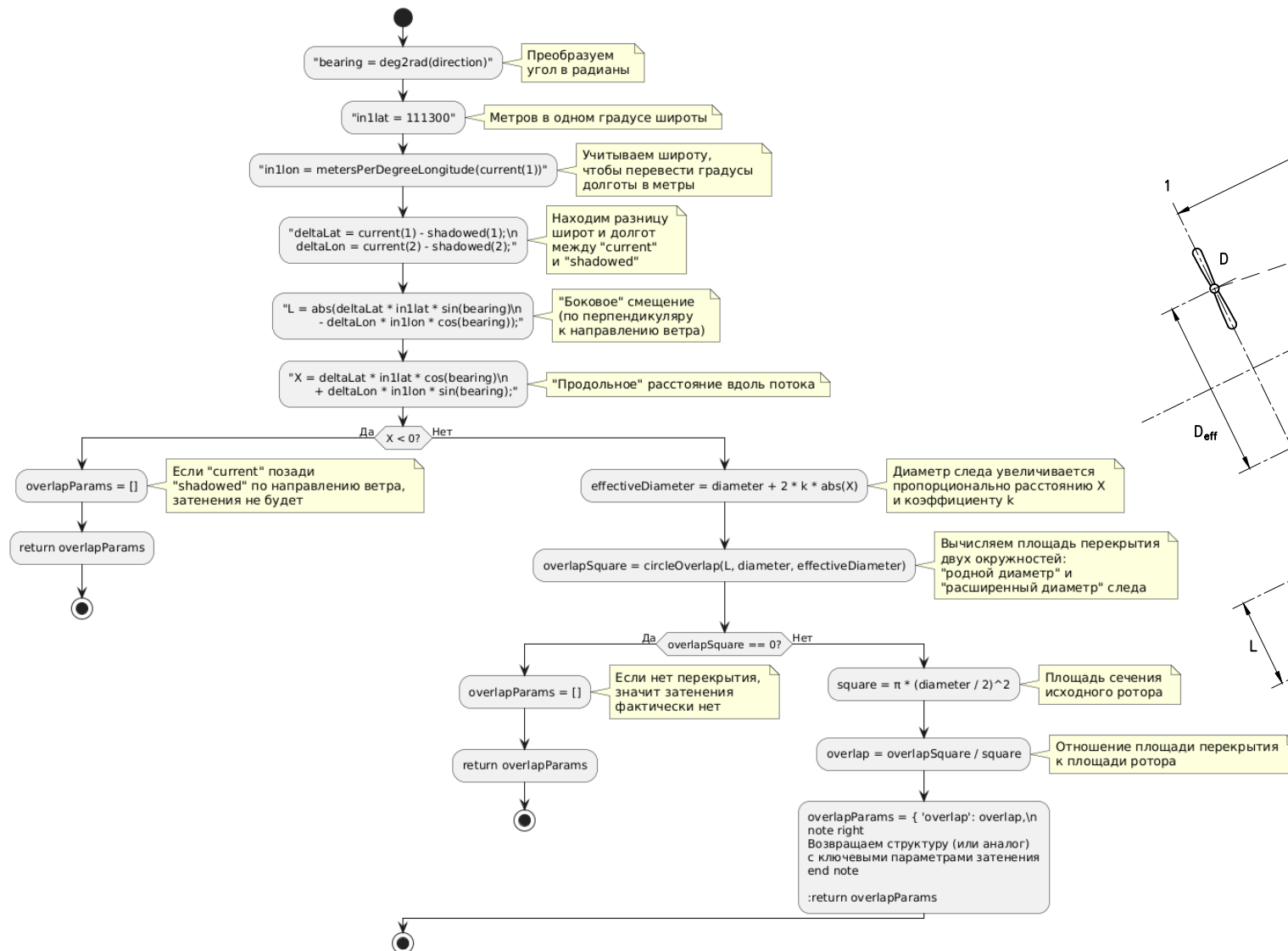
Построение карты аэродинамического затенения ВЭС (Wake Map)



- **Функция «*getOverlapParams()*»** - содержит логику нахождения геометрического перекрытия ометаемой площади ВК ВЭУ сечением спутной струи. Для этого выполняется следующая последовательность операций:
 - углы направлений ветра *windDir* преобразуются в радианы;
 - определяется масштаб в метрах на градус по широте «*in1lat*» и долготе «*in1lon*»;
 - рассчитываются разности координат ВЭУ и пересчитываются в метры ($\Delta Lat = current(1) - shadowed(1)$, $\Delta Y = \Delta Lat \times in1lat$; $\Delta Lon = current(2) - shadowed(2)$, $\Delta X = \Delta Lon \times in1lon$);
 - определяются продольные и поперечные расстояния: L – расстояние между центрами ометаемой площади ветрового колеса затеняемой ВЭУ и сечения спутной струи затеняющей ВЭУ ($L = |\Delta Y \cdot \sin(bearing) - \Delta X \cdot \cos(bearing)|$); x – расстояние между плоскостями вращения затеняющей и затеняемой ВЭУ ($x = \Delta Y \cdot \cos(bearing) + \Delta X \cdot \sin(bearing)$). Если $x < 0$, то *current* ВЭУ (затеняющая) находится за *shadowed* ВЭУ, следовательно затенения нет;
 - учет расширения спутной струи – модель предполагает, что диаметр спутной струи растет пропорционально расстоянию x по соотношению ($D_{eff} = D + 2kx$);
 - для расчета величины $\bar{A}$ вызывается функция «*circleOverlap()*».

Построение карты аэродинамического затенения ВЭС (Wake Map)

Алгоритм функции «*getOverlapParams()*», включающей «*circleOverlap()*» :



Построение карты аэродинамического затенения ВЭС (Wake Map)



- функция «**circleOverlap()**» определяет площадь пересечения окружностей с:
 - $R_1 = D/2$ – радиус ветрового колеса затеняемой ВЭУ;
 - $R_2 = D_{eff}/2$ – радиус спутной струи на расстоянии x до плоскости ветрового колеса затеняемой ВЭУ;
 - L – расстояние между осями этих двух окружностей.

При граничном условии $L \geq R_1 + R_2$ окружности не пересекаются ($\bar{A} = 0$), а при $L \leq |R_1 - R_2|$ одна окружность целиком находится внутри другой и площадь их пересечения равна площади меньшей окружности.

В остальных случаях ($\bar{A} > 0$) площадь пересечения окружностей рассчитывается, как:

$$\bar{A} = \frac{R_1^2 (F_1 - \sin(F_1))}{2} + \frac{R_2^2 (F_2 - \sin(F_2))}{2}$$

где:

$$F_1 = 2 \cdot \arccos\left(\frac{R_1^2 - R_2^2 + L^2}{2R_1L}\right), F_2 = 2 \cdot \arccos\left(\frac{R_2^2 - R_1^2 + L^2}{2R_2L}\right).$$

Показатель доли затенения, используемый в формуле сокращения скорости (I. Katić) определяется, как: $\bar{A}/A_1^{(R)}$, где $A_1^{(R)} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$.

Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)



Обычно оценка величины шероховатости подстилающей поверхности (Z_0 , см) производится в зависимости от типа поверхности в соответствии с [1] и [2].

Примеры:

- очень плоская местность (снег, пустыня) - $Z_0 = 0,001-0,03$ см;
- открытая местность (пастбище) - $Z_0 = 0,1-0,3$ см;
- пахотные земли - $Z_0 = 0,5-2$ см;
- кустарники-леса - $Z_0 = 1-50$ см;
- пригороды - $Z_0 = 150$ см;
- высотная застройка - $Z_0 = 80-300$ см.

Очевидно, что в течение года значение шероховатости изменяется, а экспертная оценка требует верификации.

Источники:

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 января 2010 г. №11 «Об утверждении Положения о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население»;
2. Holmes JD. *Wind Loading of Structures*. 3rd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2015.

Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)



Подход к моделированию величины шероховатости подстилающей поверхности (Z_0 , см) строится на использовании выражения для логарифмического профиля ветра по высоте (т.н. Уравнение Прандтля):

$$\frac{V(h_2)}{V(h_1)} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{Z_0}\right)}$$

Из данного уравнения можно выразить значение Z_0 как:

$$Z_0 = \exp\left(\frac{\ln(h_2) - \frac{V(h_2)}{V(h_1)} \cdot \ln(h_1)}{1 - \frac{V(h_2)}{V(h_1)}}\right) = \left(\frac{h_2}{h_1^r}\right)^{\frac{1}{1-r}}$$

где $r = \frac{V(h_2)}{V(h_1)}$.

В качестве исходных данных для оценки используются ряды скорости ветра $V_i(h_{\text{изм.}i})$, полученные по данным измерений ВИК (ветроизмерительного комплекса) на нескольких высотах ($h_{\text{изм.}} \geq 2$).

Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)



Альтернативный подход к моделированию величины шероховатости подстилающей поверхности (Z_0 , см) строится на использовании выражения для расчета интенсивности турбулентности [1]:

$$I_T = A_x \kappa \left[\frac{1}{\ln(h_{\text{изм.}}/Z_0)} \right]$$

где A_x - эмпирическая константа (2,5-1,8), κ - постоянная фон Кармана (0,4) (базовый вариант - $A_x \kappa = 1,0$, в соответствии с [2]);

I_T - интенсивность турбулентности: $I_T(h_{\text{изм.}}) = \frac{\sigma_V(h_{\text{изм.}})}{V(h_{\text{изм.}})}$,

где $\sigma_V(h_{\text{изм.}})$ - среднеквадратическое отклонение скорости ветра на высоте измерений;
 $V(h_{\text{изм.}})$ - скорость ветра на высоте измерений, осредненная за 10 мин (значение скорости из ряда измерений ВИК).

Из рассматриваемого уравнения можно выразить значение Z_0 как:

$$Z_0 = h_{\text{изм.}} \cdot \exp\left(-\frac{A_x \kappa}{I_T}\right)$$

В качестве исходных данных для оценки используются ряды среднеквадратических отклонений скорости ветра $\sigma_V(h_{\text{изм.}})$ и скорости ветра $V(h_{\text{изм.}})$, полученные по данным измерений ВИК (ветроизмерительного комплекса) на определенной высоте ($h_{\text{изм.}} \geq 1$).

Источник:

1. DNV & Risø: *Guidelines for the Design of Wind Turbines*, Risø National Laboratory.
2. DS472, Danish Code of Standards for Wind Turbine Structures.

Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)



Для моделирования шероховатости подстилающей поверхности (Z_0 , см) разработана программа на **Matlab R2014b**, которая:

1. Проводит подготовку данных:

- Синхронизация времени – все ряды переводятся в единый шаг (Δt) и единую временную зону измерений;
- Формат – перевод десятичного разделителя в «.»; отсутствия/аномалии переводятся в NaN;
- Высоты измерений считываются из имен столбцов (_34,0m, _11m, ...).

2. Проводит мгновенную оценку $Z_0(t)$

Шаг	Первый подход (две скорости)	Второй подход (интенсивность турбулентности)
1	Для выбранной пары высот $r(t) = V_2/V_1$	На каждом уровне: $I_T(t) = \sigma_V/V$
2	$Z_0 = (h_2/h_1^r)^{1/(1-r)}$	$Z_0 = h_{\text{изм.}} \cdot \exp(-A_x \kappa / I_T)$
3	Фильтр качества: • $V_1, V_2 \leq 0 \rightarrow NaN$ • $r = 1 \rightarrow NaN$	Фильтр качества: • $I_T \leq 0 \rightarrow NaN$
4	Отфильтровка выбросов $Z_0 > 3 \text{ м} \rightarrow NaN$	

Если уровней высот больше двух:

- Первый подход: строим все пары «нижний + каждый выше», получаем $Z_{0,i}$;
- Второй подход: получаем $Z_{0,i}$ независимо по каждому уровню.

Затем определяется среднее по уровню/парам (NaN-safe) $\rightarrow$ итоговый ряд $Z_0(t)$ 35

Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)



3. Осреднение по интервалу ΔT :

Пользователь выбирает:

Интервал ΔT	Ключ-код	Диапазон ΔT
1	«уууу-mm-dd»	сутки
2	«уууу-mm-dd» (1-10, 11-20, 21-конец месяца)	декада
3	«уууу-mm»	календарный месяц

Для каждого ключа:

$Z_0(\Delta T) = \text{mean}_{t \in \Delta T} Z_0(t)$ (NaN пропускаем).

Финальный фильтр: $Z_0 > 3 \text{ м} \rightarrow NaN$.

Практические рекомендации:

- Качество высот: $h_2/h_1 \geq 1,5$ – иначе относительная ошибка Z_0 растет;
- A_x изменяется с типом подстилающей поверхности (показатель возможно откалибровать на основании параллельного использования первого и второго подходов).

Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)



Верификация модели шероховатости подстилающей поверхности

Реализуется на основании построения регрессионной зависимости параметров **sss**, см (Snow Surface Height, высота снежного покрова) - один из метеорологических параметров, измеряемых на метеостанции-аналоге для рассматриваемой ВЭС (или ВИК) от Z_0 , см.

1. Производится предобработка данных:

- Почасовые измерения **sss** агрегируются до суточных средних значений.
- Суточные значения **sss** дополнительно агрегируются до:
 - Декадных значений (по 10-дневным интервалам),
 - Месячных значений (по календарным месяцам).

2. Для суточных, декадных и месячных интервалов построены облака точек зависимости $Z_0(sss)$.

- Для каждого интервала:
 - Выполняется аппроксимация зависимости (линейная).
 - Проводится подбор других видов аппроксимаций (полиномиальная, логарифмическая, экспоненциальная).
 - Выбирается аппроксимация с максимальным R^2 (цель – получение зависимости с коэффициентом корреляции $|r| \geq 0,7$).

Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)

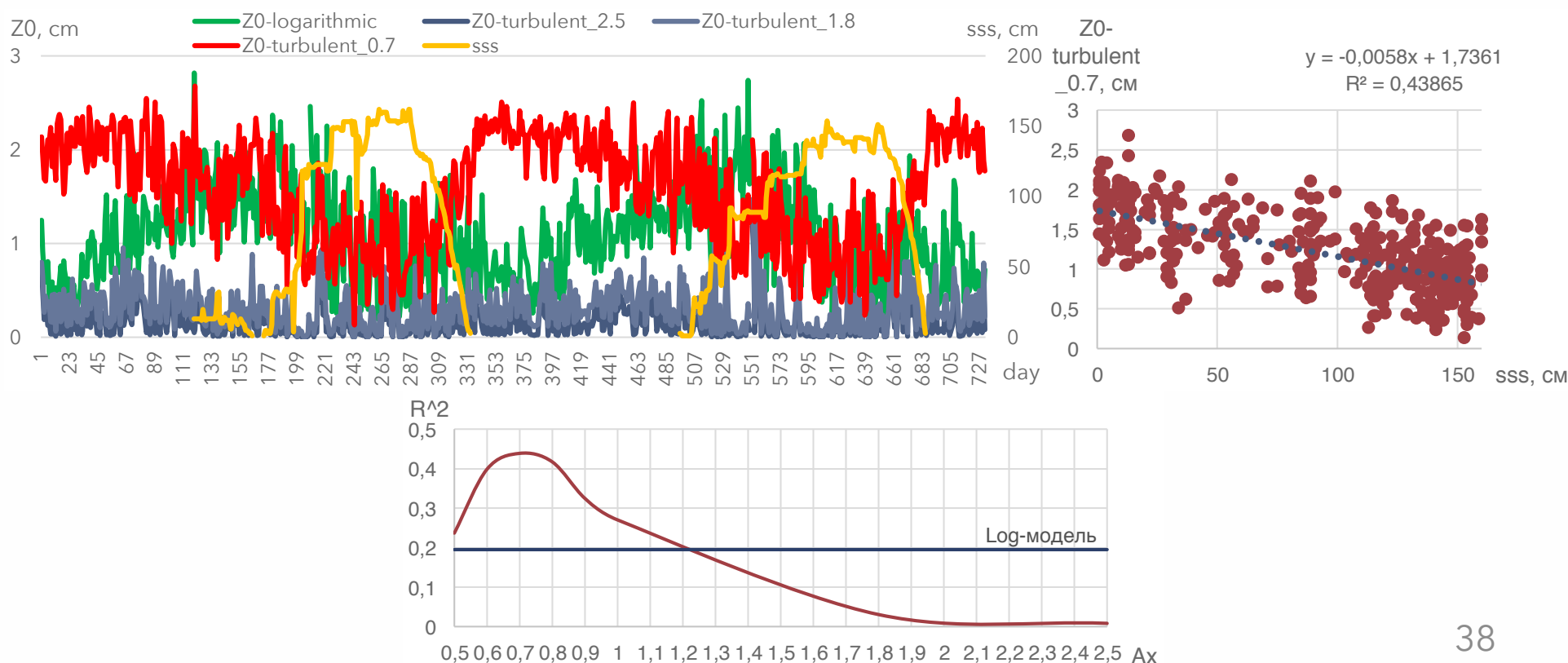


Пример верификации модели шероховатости подстилающей поверхности:

ВИК Усть-Камчатской ВЭС и МС-аналог (МС № 32408 Усть-Камчатск):

- Совместный период измерений 01.07.2010-30.06.2012;
- Измерения ВИК: MeanWindSpeedUID_34,0m, 32,0m, 21,0m, 20,0m, 11,0m; TurbIntUID_34,0m, 21,0m, 11,0m ($\Delta t = 10$ мин);
- Измерения МС-аналога: sss ($\Delta t = 24$, опр. в 12:00).

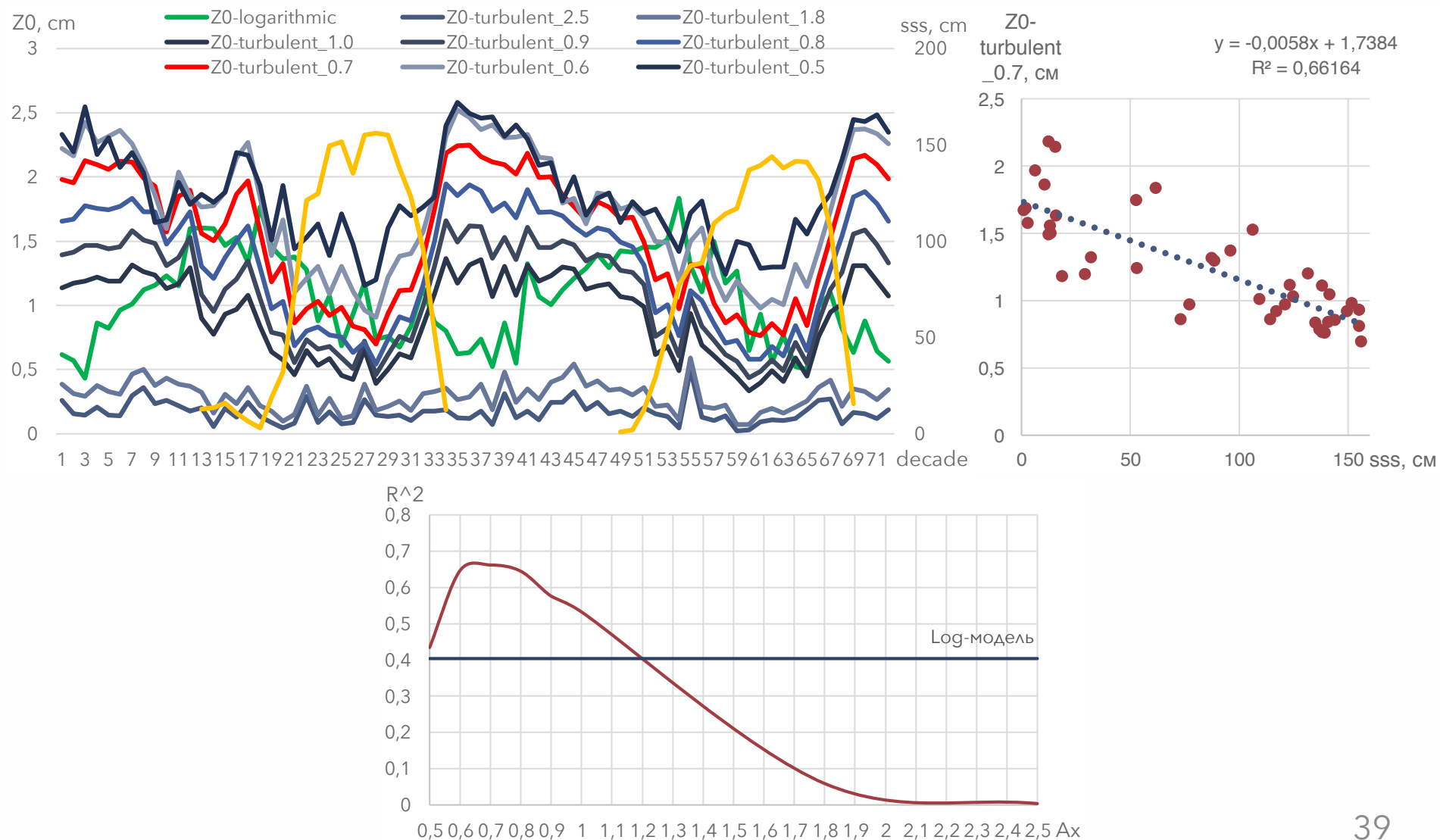
Суточный диапазон ΔT



Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)



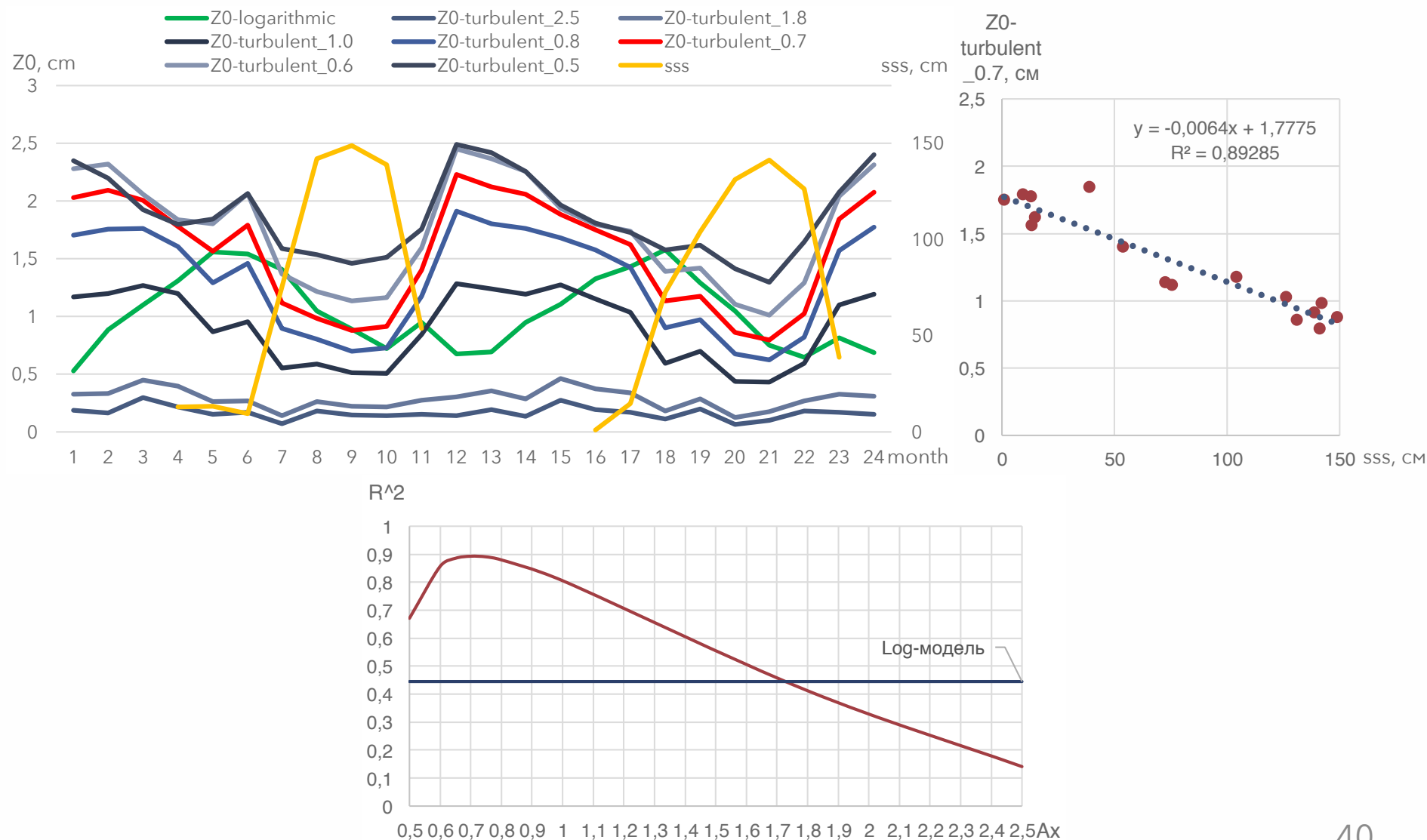
Декадный диапазон ΔT



Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)



Месячный диапазон ΔT



Разработка суб-методики №1 (Моделирование шероховатости подстилающей поверхности)



Выводы:

- Метод верификации модели $Z_0(t)$ относительно параметра **sss** показал высокую целесообразность;
- Более тесные корреляционные зависимости $Z_0(sss)$ получены для ΔT с большей дискретностью осреднения (месячная);
- Наиболее тесная корреляционная связь $Z_0(sss)$ получена по **второму подходу** (турбулентная модель, при $A_x = 0,7$) со среднемесячным осреднением с $R^2 = 0,89285$. Соответственно, целесообразно применять этот подход при условии верификации A_x по критерию $\max\{R^2\}$ для $Z_0(sss)$;
- Использование рекомендованных диапазонов $A_x = 2,5 - 1,8$ [2] (слайд 34) по **второму подходу** (турбулентная модель) показывает крайне низкий R^2 при верификации по $Z_0(sss)$ и не является оправданным;
- Использование **первого подхода** (логарифмическая модель) дает низкое значение R^2 при верификации по $Z_0(sss)$. Соответственно, его использование в качестве модели вертикального профиля ветра также менее предпочтительно по сравнению со степенной моделью;
- Стандартные значения Z_0 , принимаемые относительно типа подстилающей поверхности по источникам [1, 2] (слайд 32), является весьма ориентировочными, а их использование в инженерной практике неоправданно.

Разработка суб-методики №2 (Моделирование характеристики коэффициента тяги - $C_t(V)$)

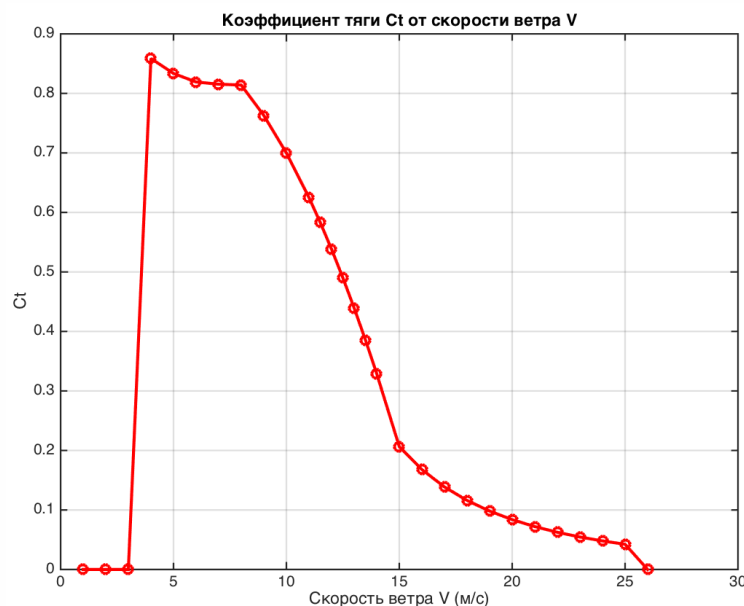


Коэффициент тяги ВЭУ (C_t) - безразмерный параметр, характеризующий силу осевого сопротивления (тяги), которая создается ветровым колесом ВЭУ, по отношению к динамическому давлению набегающего ветрового потока (T) на ометаемую площадь ветрового колеса ВЭУ ($A_1^{(R)}$):

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A_1^{(R)}}$$

Особенности коэффициента тяги ВЭУ (C_t):

- показывает насколько интенсивно ветровое колесо ВЭУ снижает скорость набегающего ветрового потока при прохождении через него;



- зависит от скорости набегающего ветрового потока (V) и в рассматриваемой методике расчета аэродинамического затенения ВЭС она используется в виде характеристики $C_t(V)$ по аналогии с мощностной характеристикой ВЭУ – $N(V)$.

Производители ВЭУ редко предоставляют характеристики $C_t(V)$ (в отличие от характеристик $N(V)$), поэтому часто в расчетах аэродинамического затенения ВЭС используются стандартные значения C_t :

- обычно $C_t = 0,75-0,9$ в нормальных рабочих условиях;
- для современных быстроходных ВЭУ $C_t = 0,7-0,8$.

Разработка суб-методики №2 (Моделирование характеристики коэффициента тяги - $C_t(V)$)



В случае недоступности характеристик коэффициента тяги ВЭУ ($C_t(V)$) от производителя целесообразно использовать численный метод моделирования.

Исходные данные:

- Мощностная характеристика ВЭУ - $N(V)$;
- Технические параметры модели ВЭУ.

На основании этих данных рассчитывается характеристика мощностного коэффициента ВЭУ $C_p(V)$:

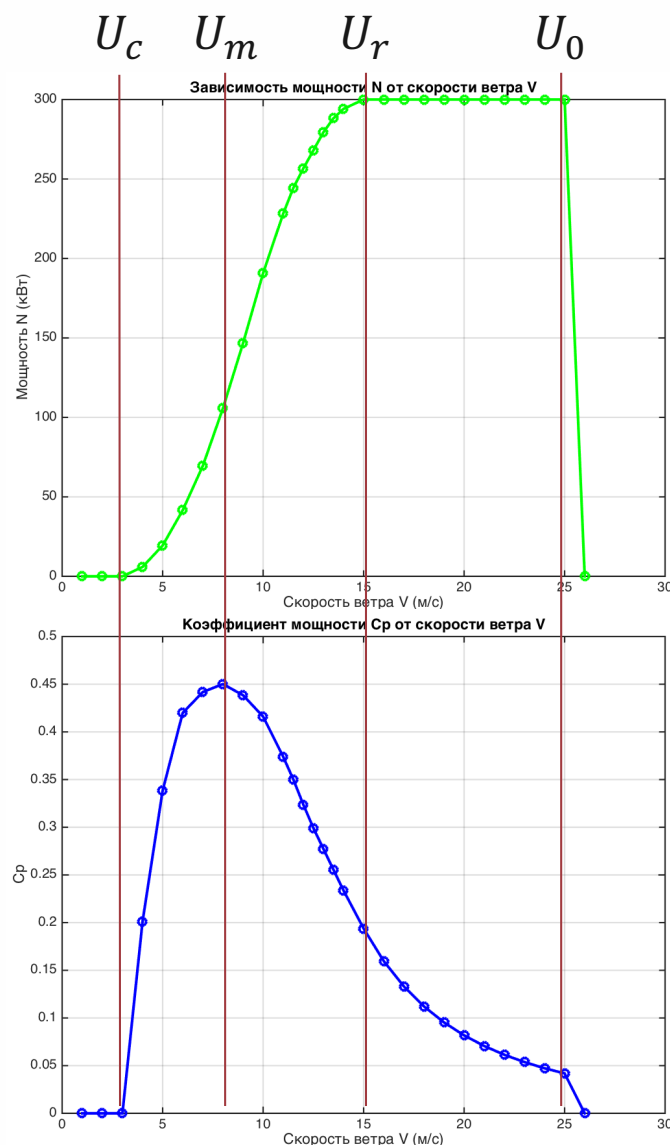
$$C_p(V) = \frac{P_{rotor}(V)}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

где A – ометаемая площадь ВК ВЭУ; ρ – плотность воздуха на высоте башни ВЭУ, при которой получена $N(V)$;

$P_{rotor}(V)$ - мощность на валу ВЭУ в зависимости от скорости по $N(V)$ с учетом $\eta_{trans}, \eta_{gen}, \eta_{conv}$ – КПД трансмиссии, конвертера и трансформатора:

$$P_{rotor}(V) = \frac{N(V)}{\eta_{trans} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{conv}}$$

Разработка суб-методики №2 (Моделирование характеристики коэффициента тяги - $C_t(V)$)



Характерные скорости:

- U_c – пусковая скорость ВЭУ ($N > 0$);
- U_m – скорость, при которой наблюдается максимум характеристики ($\max\{C_p\}$);
- U_r – расчетная скорость ВЭУ ($N_{\text{ном.}}$);
- U_0 – максимальная скорость ВЭУ (N_{max}).

Численный подход определения характеристики $C_t(V)$ базируется на теории импульса (BEM/BET и её модификациях), согласно которым C_p и C_t выражаются через коэффициент торможения a (или фактор осевой индукции):

$$C_p = 4Fa(1-a)^2$$

$$C_t = \begin{cases} 4Fa(1-a) & \text{для } 0 \leq a \leq 0.4; \\ \frac{8}{9} + \left(4F - \frac{40}{9}\right)a + \left(\frac{50}{9} - 4F\right)a^2 & \text{для } 0.4 < a \leq 1. \end{cases}$$

где $F \approx 0,9$ – поправочный коэффициент, учитывающий различные особенности аэродинамики ВК (загрязнение лопастей, концевые потери и т.п.).

Разработка суб-методики №2 (Моделирование характеристики коэффициента тяги - $C_t(V)$)

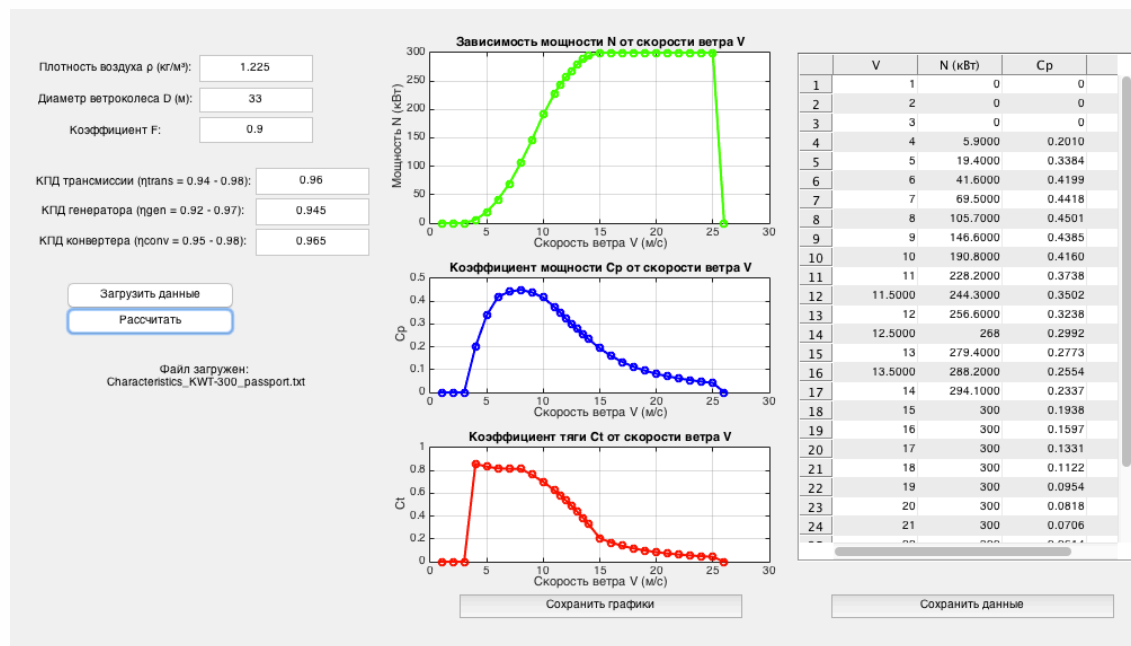


Для каждого значения $C_p(V)$ формула C_p является квадратным уравнением (два корня a), которые затем используются для определения значений C_t в зависимости от диапазона скорости ветра:

- $V < U_c$ значения $C_t = 0$;
- $U_c \leq V < U_m$ для определения C_t используется среднее значение кубических корней a ;
- $U_m \leq V < U_0$ для определения C_t используется минимальное значение из двух кубических корней a ;
- $U_m \leq V < U_r$ используется метод кусочно-полиномиальной интерполяции Акимы для определения значения a .

Расчет характеристик $C_p(V)$ и $C_t(V)$ с применением численного подхода осуществляется с помощью оригинальной программы WTCurves.

Пример расчета характеристик ВЭУ Komai KWT-300 в программе WTCurves:



Разработка суб-методики №2 (Моделирование характеристики коэффициента тяги - $C_t(V)$)



Верификация моделирования характеристики коэффициента тяги $C_t(V)$

Реализуется на основании сопоставления характеристики $C_t(V)$, рассчитанной численным методом, с характеристикой $C_t(V)$, предоставляемой производителем ВЭУ.

Критерии сопоставления:

- **Величина R^2** (цель – получение зависимости с коэффициентом корреляции $|r| \geq 0,7$, критерий качества моделирования в соответствии с [1] $R^2 \geq 0,96$).
- **Значения факторов FAC1.3, FAC1.5, FAC2** ($>0,5$):

$$\bullet \text{ FAC1.3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \text{ где } N_i = \begin{cases} 1 \text{ для } 0,77 \leq \frac{\hat{C}_{t,i}}{C_{t,i}} \leq 1,3, \\ 0 \text{ то} \end{cases}$$

$$\bullet \text{ FAC1.5} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \text{ где } N_i = \begin{cases} 1 \text{ для } 0,67 \leq \frac{\hat{C}_{t,i}}{C_{t,i}} \leq 1,5, \\ 0 \text{ то} \end{cases}$$

$$\bullet \text{ FAC2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \text{ где } N_i = \begin{cases} 1 \text{ для } 0,5 \leq \frac{\hat{C}_{t,i}}{C_{t,i}} \leq 2,0, \\ 0 \end{cases}$$

где $\hat{C}_{t,i}$ - модельное значение коэффициента тяги; $C_{t,i}$ - фактическое значение коэффициента тяги.

Источник:

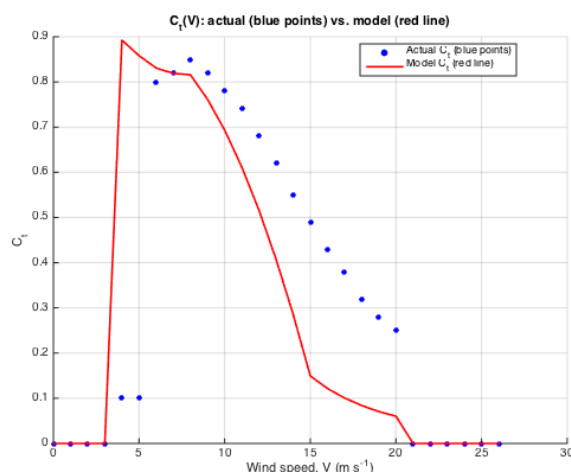
1. Vin Cent Tai et al 2024 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1372 012021

Разработка суб-методики №2 (Моделирование характеристики коэффициента тяги - $C_t(V)$)

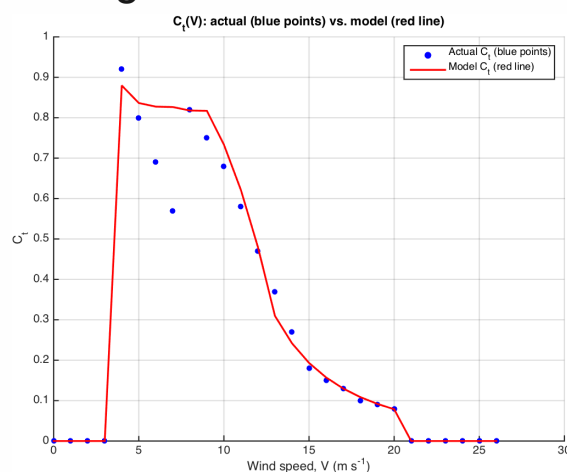


Пример верификация моделирования характеристики коэффициента тяги $C_t(V)$ - небольшие ВЭУ:

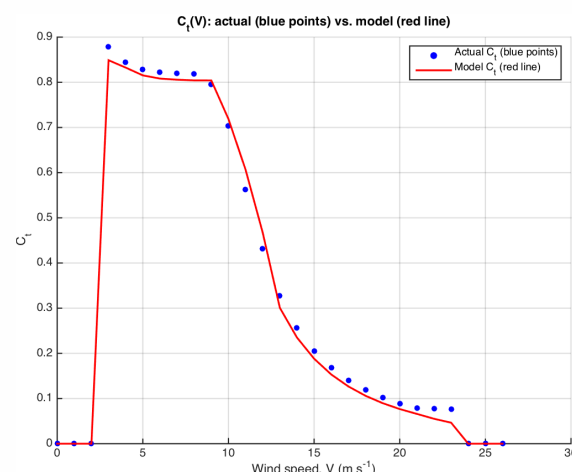
Aeronautica AW33-225



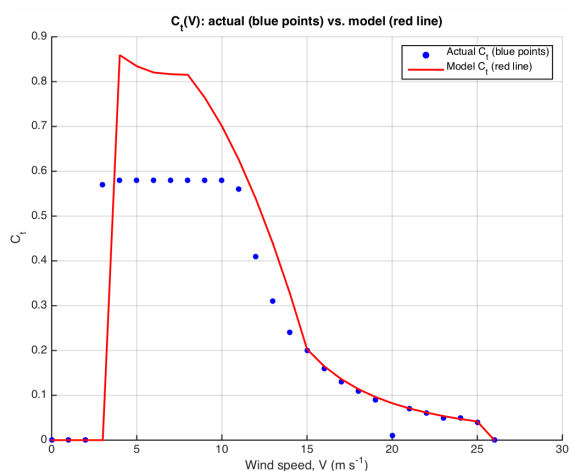
Vergnet GEV MP 275-30



Gamesa G58-850



Komai KWT33-300



Показатель	Aeronautica AW33-225	Komai KWT33-300	Vergnet GEV MP 275-30	Gamesa G58-850
R^2	0.3661	0.5275	0.9622	0.9970
FAC1.3	0.2222	0.4444	0.5926	0.7037
FAC1.5	0.2593	0.7778	0.6296	0.7407
FAC2	0.3333	0.7778	0.6296	0.7778

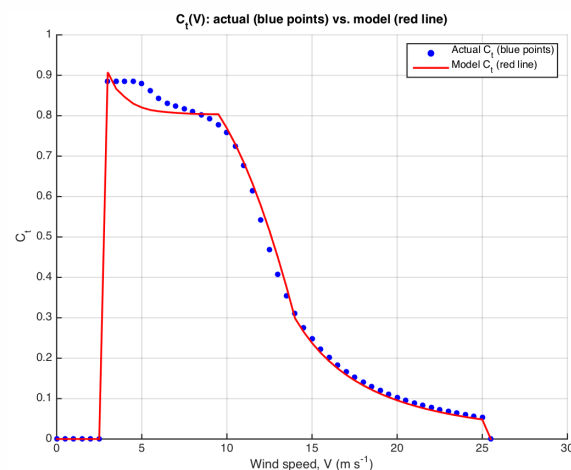
Вывод: значения показателей верификации для моделей **Vergnet GEV MP 275-30** и **Gamesa G58-850**, полностью соответствуют заданным критериям. Для остальных ВЭУ несоответствие объясняется низким качеством «съемки» характеристики $C_t(V)$ производителем оборудования.

Разработка суб-методики №2 (Моделирование характеристики коэффициента тяги - $C_t(V)$)

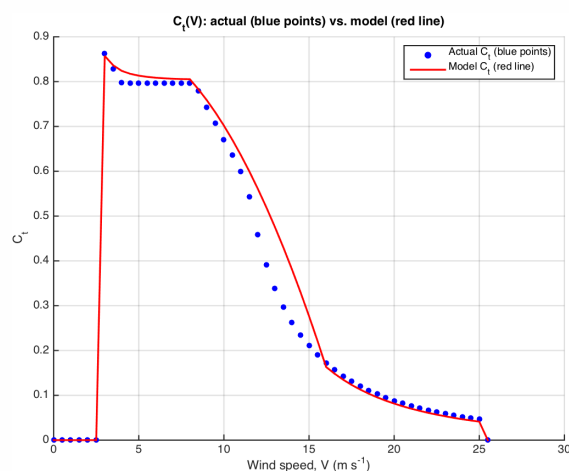


Пример верификация моделирования характеристики коэффициента тяги $C_t(V)$ - ВЭУ большой мощности:

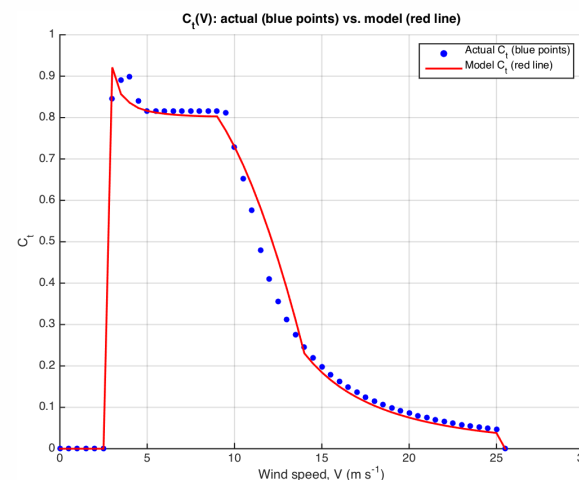
V174-9.5 MW



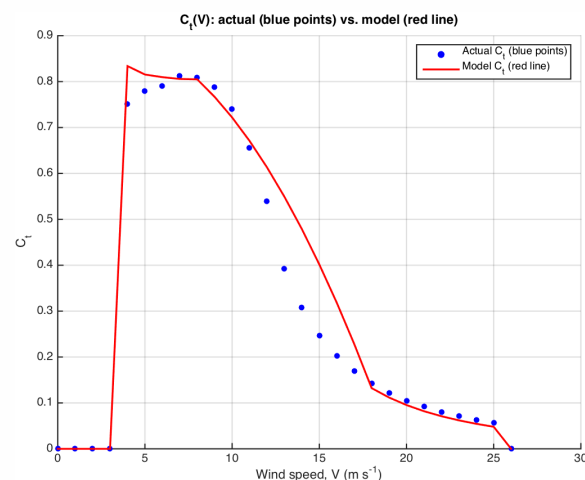
SG 10.0-193 DD



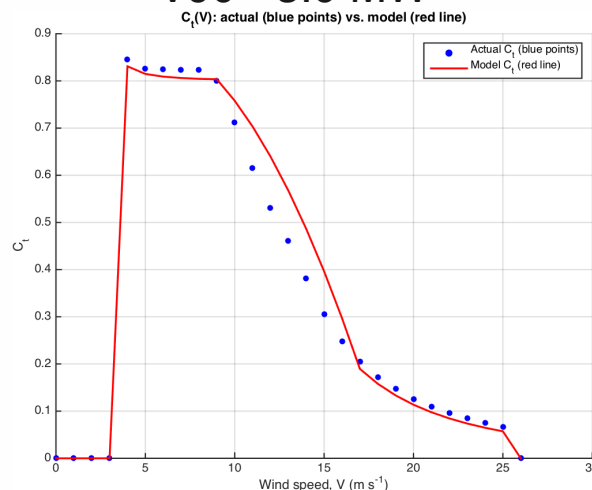
GE Haliade-X 12 MW



V80 - 2.0 MW



V90 - 3.0 MW



Разработка суб-методики №2 (Моделирование характеристики коэффициента тяги - $C_t(V)$)



Пример верификация моделирования характеристики коэффициента тяги $C_t(V)$ - ВЭУ большой мощности:

Показатель	Vestas V174-9.5 MW	Siemens-Gamesa SG 10.0-193 DD	General Electric GE Haliade-X 12 MW	Vestas V80 - 2.0 MW	Vestas V90 - 3.0 MW
R^2	0.9964	0.9807	0.9896	0.9581	0.9788
FAC1.3	0.8654	0.7500	0.8654	0.6296	0.8148
FAC1.5	0.8654	0.8654	0.8654	0.7037	0.8148
FAC2	0.8654	0.8654	0.8654	0.8148	0.8148

Вывод: значения показателей верификации для всех рассматриваемых моделей, кроме **Vestas V80 - 2.0 MW**, полностью соответствуют заданным критериям.

Для ВЭУ модели **Vestas V80 - 2.0 MW** значение R^2 близко к критерию – возможно, несоответствие объясняется низким качеством «съемки» характеристики $C_t(V)$ производителем оборудования, а также низкой аккуратностью использования значений КПД элементов ВЭУ (принимались ориентировочно).

Общий вывод:

Проведенная верификация показывает эффективность использования метода моделирования характеристики коэффициента тяги - $C_t(V)$.

Корректировка мощностной характеристики ВЭУ ($N(V)$) с учетом плотности воздуха



Корректировка мощностной характеристики ВЭУ $N(V)$ проводится в соответствии с ГОСТ Р 54418.12.1-2011 если плотность воздуха отличается $>0,05 \text{ кг/м}^3$ от стандартного значения $1,225 \text{ кг/м}^3$.

Расчет фактической плотности воздуха:

$$\rho(t^0, \nabla) = 3,4837 \cdot \frac{P}{t^0}$$

где t^0 – температура окружающей среды в градусах Кельвина, P – атмосферное давление в кПа – возможно аппроксимировать в зависимости от абсолютной отметки (∇ , м) (до высоты 5000 м): $P = 101,29 - 0,011837 \cdot \nabla + 4,793 \cdot 10^{-7} \cdot \nabla^2$.

Корректировка выполняется в зависимости от типа регулирования ВЭУ:

- **pitch-регулирование:** изменение ρ ведет к смещению расчетной скорости ветра V_P^N в сторону больших (или меньших) значений:

$$V_P^N(\nabla_1) = V_P^N(\nabla_0) \cdot \left(\frac{\rho_0(\nabla_0)}{\rho_1(\nabla_1)} \right)^{1/3},$$

где $\rho_1(\nabla_1)$ – фактическая плотность воздуха на высоте ∇_1 , м над уровнем моря и среднемноголетней температуре на площадке ВЭС; $\rho(\nabla_0)$ – плотность воздуха на среднем уровне моря при 15°C ($\rho_0(\nabla_0) = 1,225 \text{ кг/м}^3$).

- **stall-регулирование:** ведется пересчет мощности во всем диапазоне рабочих скоростей ветра:

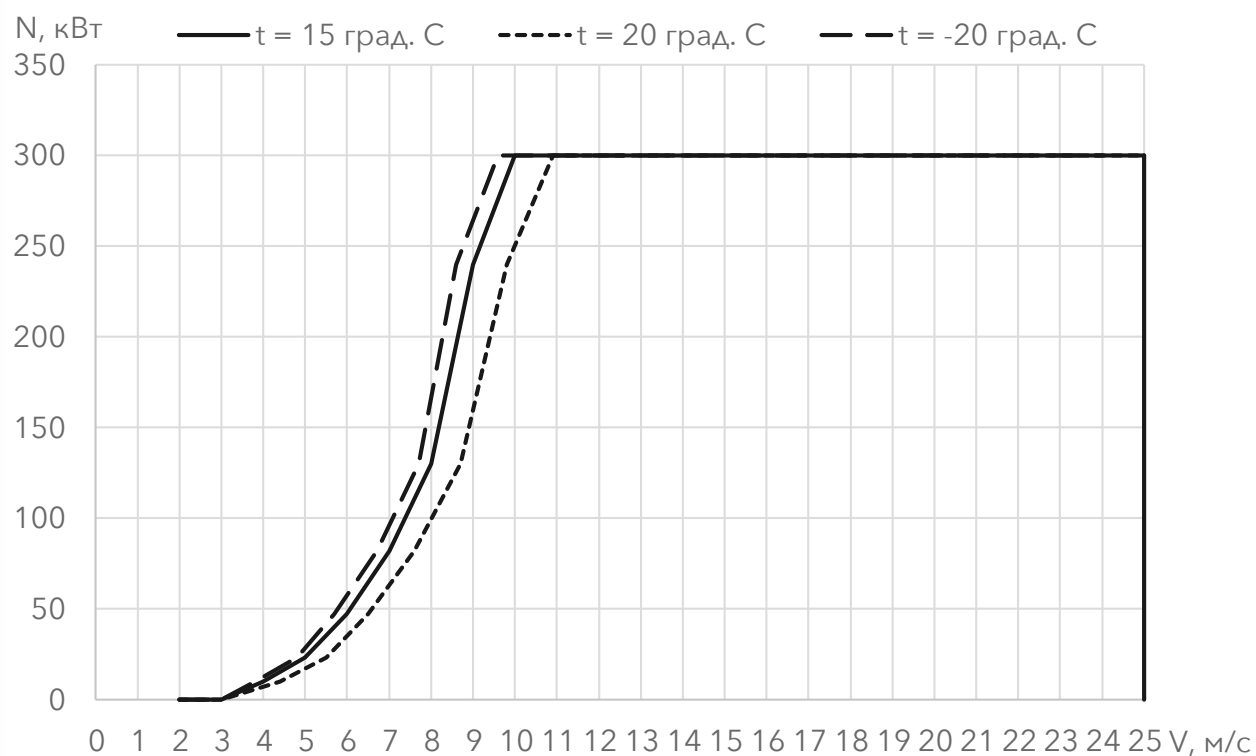
$$N_1(\rho_1) = N_0(\rho_0) \cdot \frac{\rho_0(\nabla_0)}{\rho_1(\nabla_1)}.$$

Корректировка мощностной характеристики ВЭУ ($N(V)$) с учетом плотности воздуха



Пример: ВЭУ Komai KWT-300

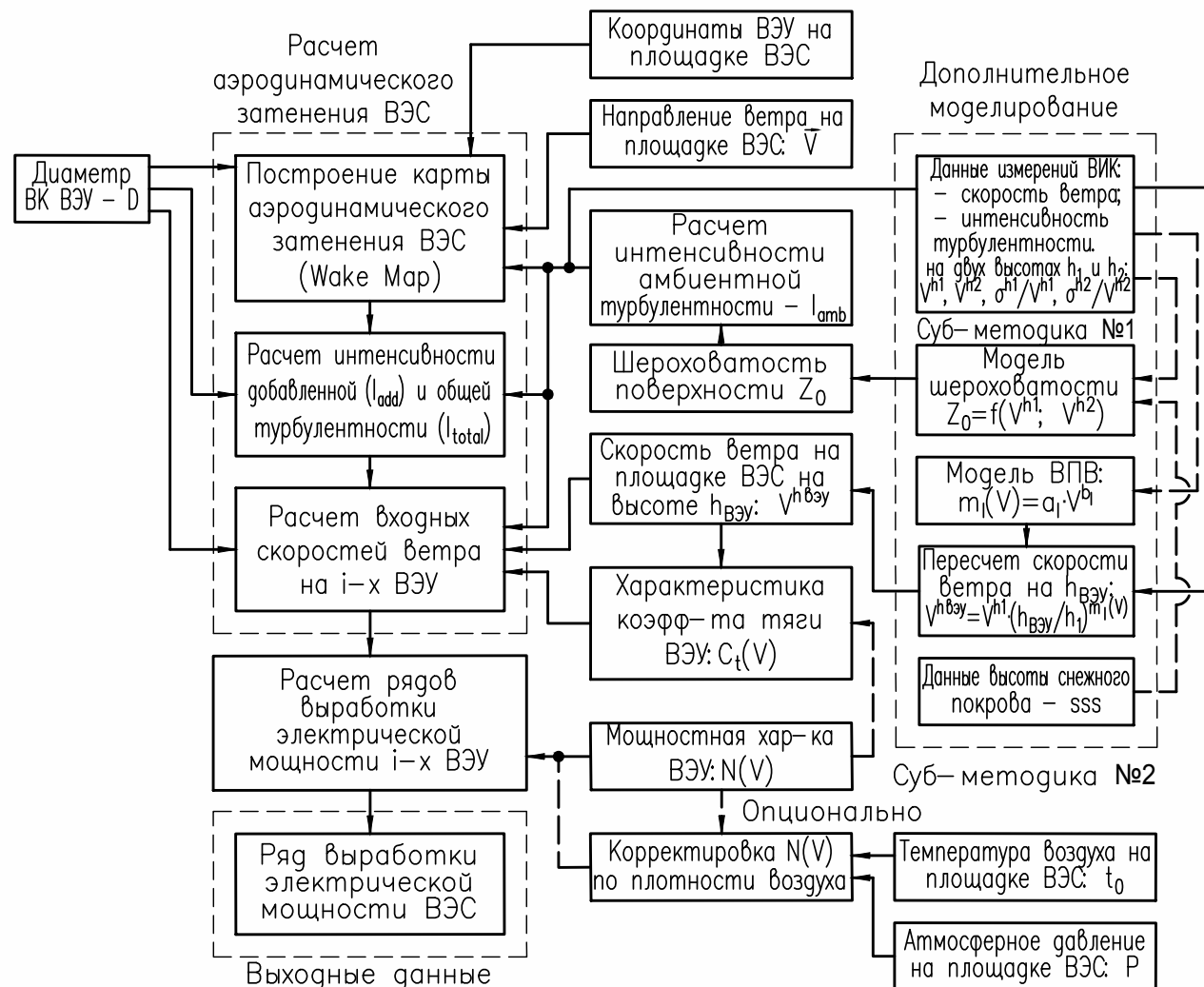
N, кВт		0,0	0,0	10	23	47	82	130	240	300	300	300
V, м/с	$\Delta = 0 \text{ м, } t = 15^{\circ}\text{C; } \rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	...	25,0
	$\Delta = 2000 \text{ м, } t = 20^{\circ}\text{C; } \rho = 1,01 \text{ кг/м}^3$	2,0	3,0	4,4	5,5	6,5	7,6	8,7	9,8	10,9	...	25,0
	$\Delta = 0 \text{ м, } t = -20^{\circ}\text{C; } \rho = 1,39 \text{ кг/м}^3$	2,0	3,0	3,8	4,8	5,7	6,7	7,7	8,6	9,6	...	25,0



Расчет выработки ВЭС с учетом аэродинамического затенения



Модернизированная схема расчета выработки ВЭС с учетом аэродинамического затенения:



Расчет выработки ВЭС (ряд значений вырабатываемой электрической мощности - $N_i^{ВЭС}(t)$) с учетом аэродинамического затенения проводится с учетом особенностей используемой модели спутной струи (G.C. Larsen) и ее практической имплементации (авторская модель – см. слайд 21).

Программный комплекс для ветроэнергетических расчетов «Wind Energy PRO»



- Программный комплекс «Wind Energy PRO» разработан сотрудниками НИУ «МЭИ» и НИУ МГСУ для создания доступного, удобного и функционального инструмента для специалистов и образовательных учреждений в области ветроэнергетики.
- Программный комплекс оптимизирует процессы проектирования, инжиниринга и оценки эффективности ВЭС, объединяя ключевые модули для расчета ветроэнергетического кадастра, вертикальной и горизонтальной интерполяции скорости ветра, оценки выработки энергии отдельными ВЭУ и ВЭС в целом.



Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660509 Российская Федерация. "Программный комплекс "Wind Energy PRO": № 2024618446: заявл. 17.04.2024: опубл. 07.05.2024 / Д. А. Корнев, Е. В. Игнатьев, Г. В. Дерюгина. – EDN НТНВQВ.

Ветроэнергетические расчеты

Проектирование ВЭС требует выполнения расчетов ветроэнергетических ресурсов на различных этапах, включающих технико-экономическое обоснование и оптимизацию при эксплуатации.

Согласно техническим требованиям РД52.04.275-89, характеристики ветра, используемые в расчетах, делятся на три группы:

- **Общие климатические характеристики (ветроэнергетический кадастр):** $\bar{V}_0, C_V, V_{max}, N_{уд}, \mathcal{E}_{уд}, t(V), t(\vec{V}), \beta, \gamma$. Используются для оценки теоретического (или валового) потенциала энергии ветра;
- **Технические ресурсы ветроэнергетики:** Используются для оценки энергетической эффективности ВЭС с учетом реальных условий эксплуатации;
- **Расчеты ветрового воздействия:** Оценка прочности и устойчивости конструкций ВЭУ, учитывающая нагрузки, аэродинамические эффекты и другие динамические силы.

Сложности расчетов: расчеты требуют сложной обработки данных, включающей большие массивы данных, множество переменных и сложные модели. Ручное выполнение этих задач приводит к ухудшению временных и стоимостных характеристик, а также возможному снижению точности и качества инжиниринга. В связи с этим специализированные программные продукты необходимы с целью оптимизации и повышения точности расчетов.

Существующее программное обеспечение для проведения ветроэнергетических расчетов



Наиболее популярный в международной инженерной практике программный продукт – программный комплекс WindPRO (EMD International A/S).

WindPRO имеет модульную структуру, охватывающую различные аспекты проектирования и планирования режимов ВЭС: в т.ч. оценку ветровых ресурсов, моделирование выработки ВЭУ и расчет выработки ВЭС с учетом аэродинамического затенения.

Недостатки WindPRO:

- **Высокая стоимость:** для базовой функциональности требуется покупка нескольких модулей отдельно (BASIS (администрирование проекта), METEO (оценка ресурсов) и MODEL (расчет энергетической эффективности ВЭС)).
- **Необходимость обучения:** для эффективного использования WindPRO пользователям требуется пройти курс обучения (стандартный и продвинутый курсы – 5 дней онлайн);
- **Ограничения с ТЗ лицензирования:** хотя существуют относительно доступные лицензии для студентов и образовательных учреждений, они предоставляются по специальным условиям и требуют персональных запросов, такие лицензии имеют ограничения по времени использования и не могут использоваться для коммерческих целей.

Необходимость альтернативных решений: Эти ограничения подчеркивают потребность в более доступном и экономичном программном решении для небольших организаций и образовательных учреждений без ущерба для точности расчетов.

Обзор разработанного программного комплекса Wind Energy PRO



Основные функции:

- **Расчет ветроэнергетического кадастра:** Использует данные из открытых информационных источников для оценки ветроэнергетического потенциала.
- **Вертикальная интерполяция скорости ветра:** Моделирует вертикальный профиль скорости ветра.
- **Расчет энергетической эффективности ВЭУ:** Определяет выработку электроэнергии отдельной ВЭУ на основе данных ветровых ресурсов и технических характеристик ВЭУ.
- **Оценка энергетической эффективности ВЭС:** Рассчитывает общую выработку электроэнергии ВЭС, учитывая потери от аэродинамического затенения ВЭУ на площадке ВЭС.

Структура программного обеспечения:

Модульная структура Wind Energy PRO аналогична WindPRO, но разработана с упором на простоту использования и доступность. Четыре модуля повторяют функциональность четырех основных модулей WindPRO.

Технические характеристики:

- Wind Energy PRO построен на основе фреймворка PHP/Laravel и функционирует как веб-ресурс, совместимый с любым браузером на основе движка Blink.
- Программное обеспечение требует минимальных серверных ресурсов: PHP версии 8.2 и выше и PostgreSQL версии 15 и выше.

Обзор разработанного программного комплекса Wind Energy PRO



- **Технологические платформы:**

- Программный комплекс разработан с использованием PHP/Laravel для использования в качестве веб-приложения, доступного через современные браузеры (Microsoft Edge, Google Chrome, Safari).
- Использует интегрированные библиотеки:
 - **Laravel Geocoding:** Предоставляет геолокационные сервисы в качестве альтернативы ArcGIS для выбора точек на поверхности Земли.
 - **Laravel HTTP Client:** Позволяет взаимодействовать с внешними источниками данных, такими как базы данных NASA, для получения метеорологических данных в режиме реального времени.
 - **Symfony DomCrawler:** Позволяет программному обеспечению обрабатывать HTML-данные, что способствует извлечению соответствующей информации с различных веб-сайтов.
 - **Laravel Leaflet:** Помогает в выборе и картировании точек на поверхности Земли для точных оценок мест.
 - **SQLite Support:** Использует встроенную поддержку SQLite в Laravel через Eloquent ORM для управления базами данных высот, что способствует интерполяции данных о скорости ветра.
- **Собственные базы данных:** Программное обеспечение включает интегрированные базы данных (в т.ч. разработанные на кафедре Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ»), включая глобальную модель рельефа «ETOPO2» от NOAA.

Обзор разработанного программного комплекса Wind Energy PRO



1. Модуль расчета ветроэнергетического кадастра:

- Разработан для извлечения и обработки данных из информационных источников (RP5 и NASA)
- Осуществляет корректировку и моделирование данных за заданный период, включая расчет $\bar{V}_0, C_V, V_{max}, N_{уд}, \mathcal{E}_{уд}, t(V), t(\vec{V}), \beta, \gamma$.

2. Модуль вертикальной интерполяции скорости ветра:

- Позволяет генерировать ряды скорости ветра на любой высоте на основе входных данных о скорости ветра, направлении ветра и температуре воздуха по данным МС.
- Использует логарифмические и степенные модели вертикального профиля ветра.
- Может обрабатывать пользовательские данные (ВИК).

3. Модуль расчета выработки электроэнергии ВЭУ:

- Рассчитывает основные параметры выработки электроэнергии для одиночной ВЭУ.
- Использует обработанные данные из модуля вертикальной интерполяции или пользовательские данные на высоте башни ВЭУ рассматриваемой модели.
- Позволяет рассчитывать мощностные характеристики ВЭУ на основе паспортных данных (для ВЭУ с pitch-регулированием).

4. Модуль расчета выработки энергии ВЭС:

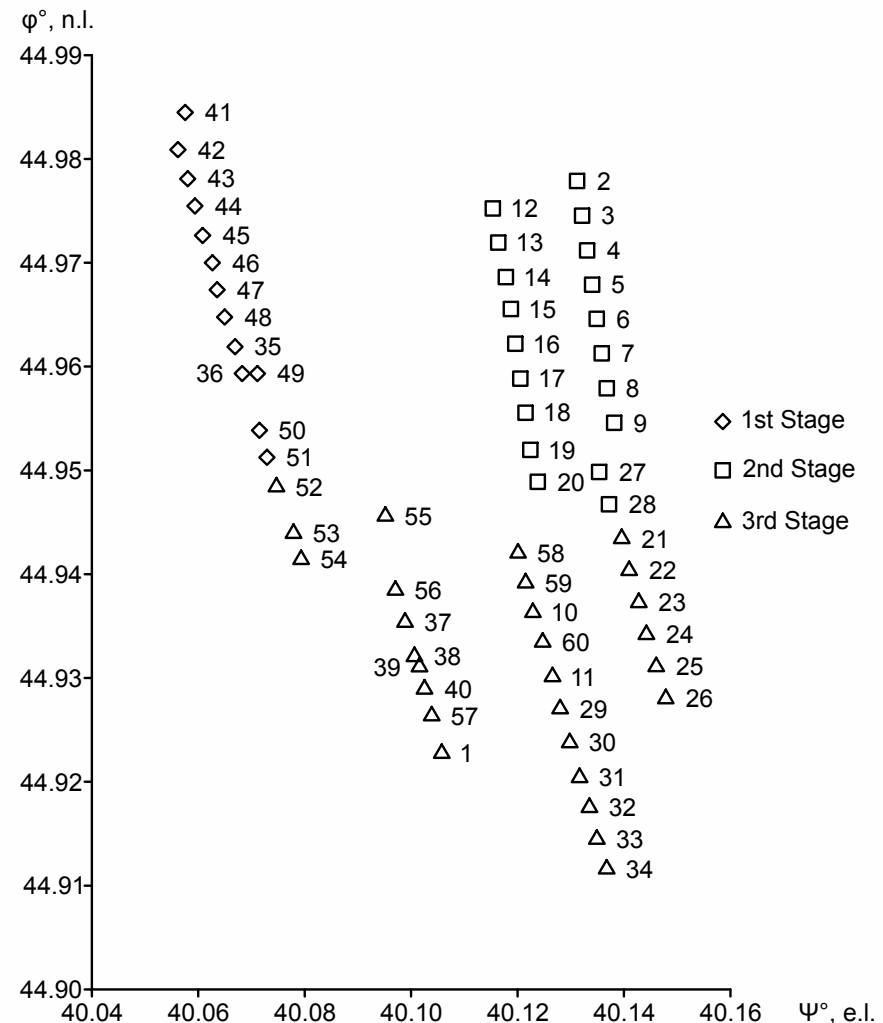
- Оценивает общую энергетическую эффективность ВЭС с учетом аэродинамических потерь на взаимное затенение ВЭУ.
- Предоставляет данные о выработке как всей ВЭС, так и отдельных ВЭУ (с учетом взаимного аэродинамического затенения).

Апробация программного комплекса Wind Energy PRO: рассматриваемый объект



Апробация программного комплекса Wind Energy PRO проводилась на основе эксплуатационных данных Адыгейской ВЭС мощностью 150 МВт, расположенной в Шовгеновском районе Республики Адыгея, Россия.

- Адыгейская ВЭС состоит из 60 ВЭУ модели L100-2.5 (Lagerwey) номинальной мощностью 2,52 МВт;
- Эксплуатационные данные представлены в виде серий за 2021 год, включающих почасовые значения выработки всех ВЭУ, установленных на трех стадиях строительства:
 - Стадия I - 13 ВЭУ;
 - Стадия II – 19 ВЭУ;
 - Стадия III – 28 ВЭУ.



Апробация программного комплекса Wind Energy PRO: рассматриваемый объект



На основе эксплуатационных данных Адыгейской ВЭС за 2021 год ($\Delta t = 1$ ч) были проведены расчеты выработки электроэнергии ВЭС по этапам, а также средней выработки энергии каждой ВЭУ по отдельным стадиям и всей ВЭС в целом.

- Рассчитан коэффициент использования установленной мощности ($K_{иум}$) для каждого этапа и в целом по ВЭС;
- Выполнена оценка максимальной возможной выработки электроэнергии ВЭС (356460 МВт·ч в год) путем суммирования максимальной возможной выработки средней ВЭУ по каждому из трех стадий (от 5195,8 до 5539,7 МВт·ч в год);
- Полученные результаты учитывают общие потери как каждой отдельной ВЭУ, так и всей ВЭС, включая потери на аэродинамическое затенение;
- Относительное отклонение δ , % фактической выработки ВЭС от максимальной возможной составляет от 6,8% до 12,5% в зависимости от стадии (средние потери составляют 11%).

Очередь	Выработка ВЭС, МВт·ч	Выработка осредненной ВЭУ, МВт·ч	$K_{иум}$, %	Макс. возможная выработка ВЭС, МВт·ч
1	72016,1	5539,7	25,3	77233
2	99860,2	5255,8	24	112879
3	145482,4	5195,8	23,7	166348
оср.	317358	5289,3	24,2	356460

Апробация программного комплекса Wind Energy PRO: рассматриваемый объект



Эксплуатационные данные о скорости ($V_i^{H_6}$, м/с) и направлении ветра ($\vec{V}_i^{H_6}$, м/с) на высоте башни ВЭУ отсутствуют, поэтому было проведено моделирование скорости ветра на площадке Адыгейской ВЭС на основе различных информационных источников (МС-аналог) и моделей (горизонтальная и вертикальная интерполяция):

- Для оценки точности моделирования использовались сравнительные расчеты выработки электроэнергии ВЭС, основанные на эксплуатационных данных ($N_i^{ВЭС}$, МВт) и модельных рядах скорости ветра ($V_i^{мод.}$, м/с).

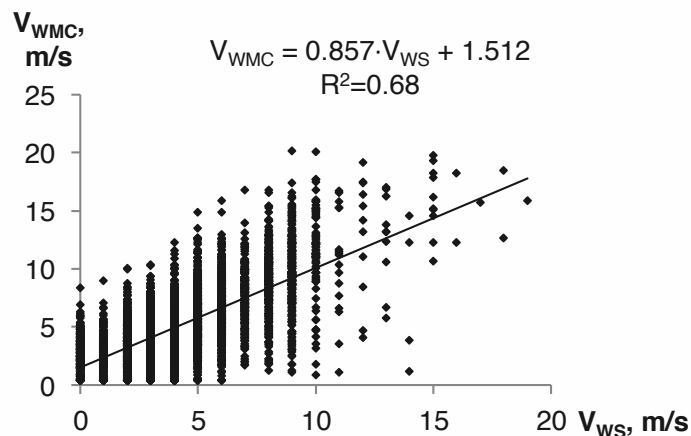
Исходные данные для расчетов с использованием Wind Energy PRO:

- Массив географических координат расположения всех 60 ВЭУ;
- Ряды значений скорости и направления ветра, а также интенсивности турбулентности по данным ВИК "Шовгеневский", расположенного на площадке Адыгейской ВЭС (для высот 30, 45, 60, 78, 80 м) (период наблюдений 13.06.2013-12.06.2014 гг.) $\Delta t = 10$ мин;
- Ряды скорости и направления ветра по данным МС-аналога Аэропорт «Краснодар» на высоте 10 м (период наблюдений 01.01.2021-31.12.2021) $\Delta t = 30$ мин;
- Паспортная мощностная характеристика ВЭУ L100-2.5 МВт - $N(V)$;

Апробация программного комплекса Wind Energy PRO: рассматриваемый объект



Поскольку оперативные данные о скорости и направлении ветра на высоте башни ВЭУ отсутствуют, был проведен расчет скорости ветра с использованием модели горизонтальной (модель №1) и вертикальной интерполяции (модель №2).



Модель №1: Является регрессионной зависимостью между средними значениями скорости ветра ($\Delta t = 10$ мин.) на высоте 30 м (ВИК «Шовгеновский») и на МС Аэропорт «Краснодар» на высоте 10 м:

$$V_{ВИК}^{30} = 0,857 \cdot V_{МС}^{10} + 1,512;$$

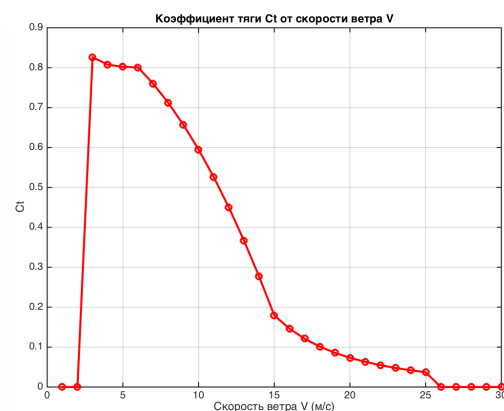
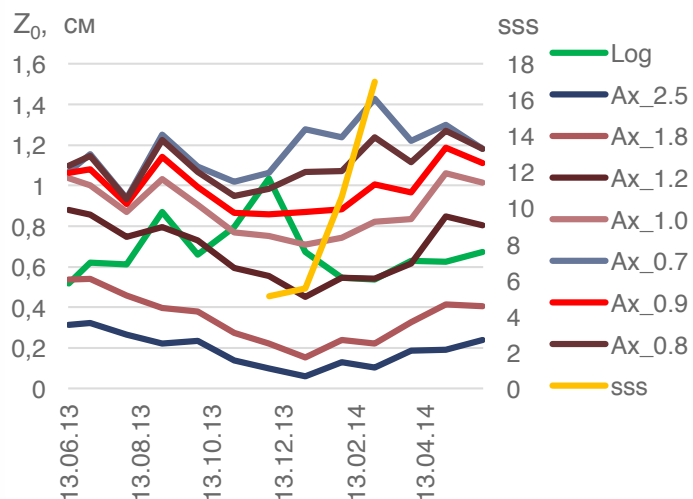
Модель №2: Для вертикальной интерполяции среднечасовой скорости ветра выбрана модель вертикального профиля ветра по степенной зависимости:

- Формула: $V_i^{h2} = V_i^{h1} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{m_i}$, где m_i определяется в зависимости от скорости и температуры ветра: $m(V, T) = a(T)V^{b(T)}$;
- Разработка модели основывалась на 10-минутных рядах скорости ветра, измеренных на высотах 30 и 78 м на ВИК «Шовгеновский».

Апробация программного комплекса Wind Energy PRO: рассматриваемый объект



Характеристики шероховатости подстилающей поверхности $Z_0(t)$ и коэффициента тяги ВЭУ $C_t(V)$, необходимые для проведения аэродинамического расчета, определяются на основе результатов использования суб-моделей №1 и №2.



Суб-модель №1: расчет значений шероховатости подстилающей поверхности с использованием данных ВИК «Шовгеновский» о скорости и интенсивности турбулентности на нескольких высотах с принятым временным осреднением (среднемесячные значения). Проведен выбор модели с наилучшим показателем R^2 по линейной регрессионной зависимости $Z_0(sss)$ - оптимум при $A_x = 0,9$ ($R^2 = 0,8925$).

Суб-модель №2: Численное моделирование характеристики коэффициента тяги ВЭУ $C_t(V)$ на базе мощностной характеристики ВЭУ $N(V)$.

Расчет потерь на затенение с использованием Wind Energy PRO

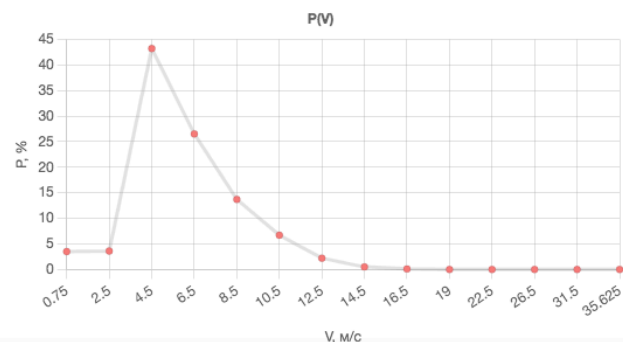
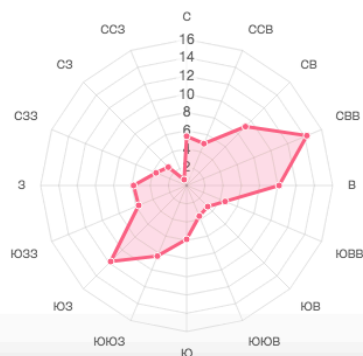


В программном комплексе Wind Energy PRO была проведена оценка выработки всех 60 ВЭУ с учетом и без учета влияния аэродинамического затенения.

Ветровой кадастр в точке ВИК «Шовгеновский» по моделированным данным МС-аналога Аэропорт «Краснодар» (исп. Модель №1 и №2)

Адыгейская ВЭС (Файл)

Длительность 1 год			Удельная мощность	210.25	Вт/м ²
Количество измерений	8760	штг.	Удельная энергия	1841.79	кВт*ч/м ²
Ожидаемое число измерений	8760	штг.	Среднеквадратическое отклонение скорости	2.29	м/с
Полнота ряда	100	%	Минимальная скорость	0	м/с
Высота наблюдений	100	м	Максимальная скорость	21.01	м/с
Фактическая плотность воздуха	1.2069	кг/м ³	γ	2.86	
Средняя скорость	6.11	м/с	β	6.86	м/с
Коэффициент вариации σ_v	0.37				



Расчет потерь на затенение с использованием Wind Energy PRO



Оценка выработки одиночной ВЭУ (без учета влияния аэродинамического затенения) – используется для оценки величины потерь на аэродинамическое затенение

Адыгейская ИЭС

☒ Использовать фактическую плотность воздуха

Степенная зависимость

Поиск подпорядков АМС

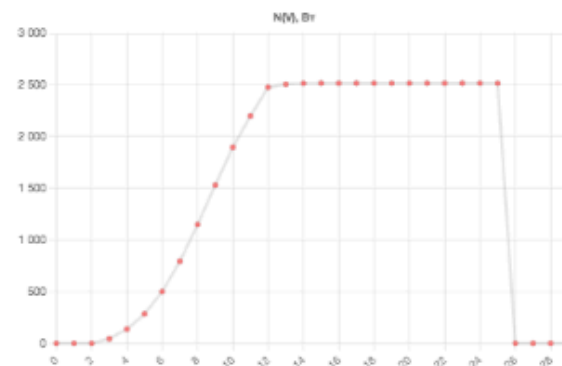
Расчет 1.100/2.5

БД Оборудование

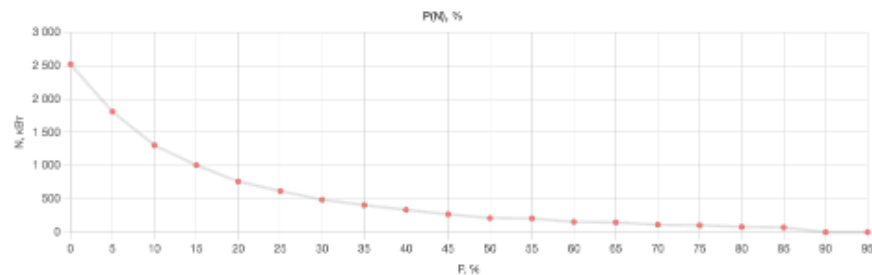
100 м

☐ Учитывать диапазон рабочих температур ВЭУ

☐ Скорректировать мощностную характеристику



Годовая выработка 4069 МВт*ч
Полная выработка 4069 МВт*ч
Коэффициент использования 0.19
Число часов использования 1627.56
Удельная выработка 518.07 кВт*ч/м²



Расчет потерь на затенение с использованием Wind Energy PRO



Оценка выработки одиночной ВЭУ (с учетом влияния аэродинамического затенения) – используется для оценки величины потерь на аэродинамическое затенение

Параметры расчета

Адыгейская ВЭС

Росатом L100/2,5

БД Оборудование

100 м

☐ Учитывать диапазон рабочих температур ВЭУ

☐ Скорректировать мощностную характеристику

☒ Использовать фактическую плотность воздуха

Шероховатость подстилающей поверхности, см

Настроено 12 диапазонов

Расчитать

Карта

Спутник

Зарево

Дорошенко

Михайлов

Новый

Нижний Айрюм

79K-001

1 км

© Яндекс Условия использования

Яндекс

Параметры размещения ВЭУ

Скачать файл

Произвольно

По заданному направлению

Добавить ВЭУ

Загрузить из файла

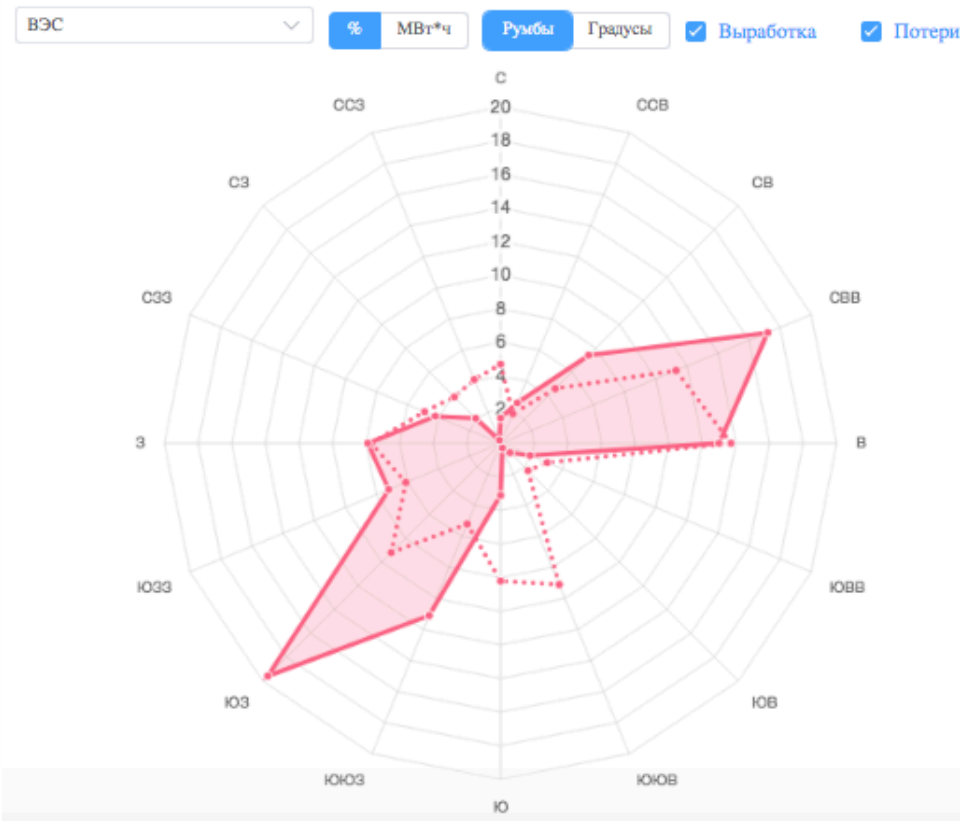
Координаты выбранных ВЭУ

Название	Координаты	
ВЭУ 1	40.106281 44.923036	...
ВЭУ 2	40.132219 44.977406	...
ВЭУ 3	40.133275 44.974117	...
ВЭУ 4	40.134203 44.970778	...
ВЭУ 5	40.135211 44.967611	...
ВЭУ 6	40.136117 44.964319	...
ВЭУ 7	40.137142 44.960978	...
ВЭУ 8	40.138178 44.957672	...

Расчет потерь на затенение с использованием Wind Energy PRO



Диаграммы распределения выработки и потерь



Анализ влияния направлений ветра:

Проведен анализ влияния повторяемости направлений ветра на величину потерь для каждой ВЭУ и всей ВЭС.

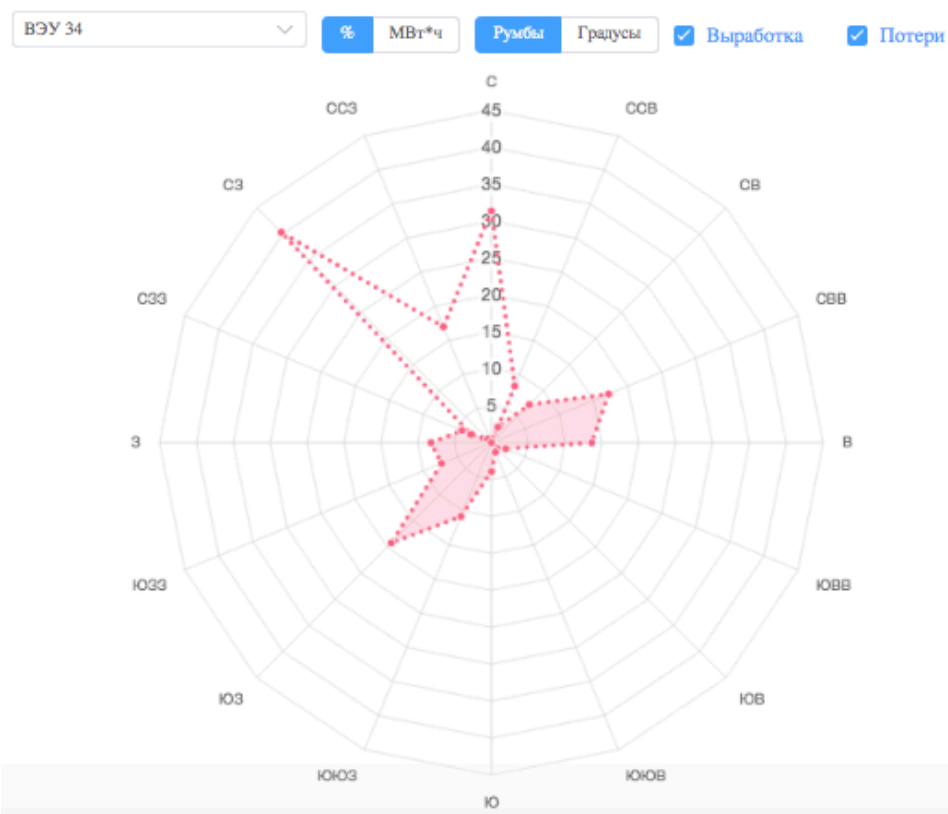
- Max потери на аэродинамическое затенение наблюдаются на направлениях В, ЮЮВ и ЮЮЗ, (их повторяемость составляет около не превышает 10, 8 и 4%, соответственно).
- Min потери на аэродинамическое затенение наблюдаются на направлении ССВ.

Расчет потерь на затенение с использованием Wind Energy PRO



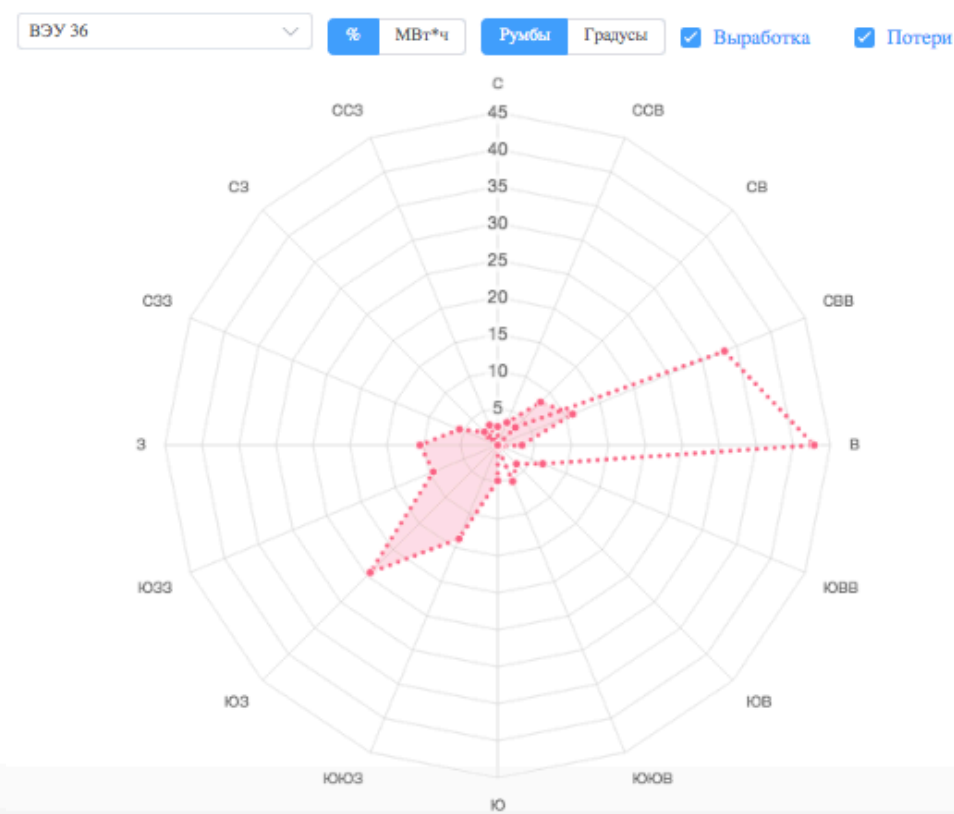
Наименее затененная ВЭУ №34 (4,2% потерь)

Диаграммы распределения выработки и потерь



Наиболее затененная ВЭУ №36 (24,7% потерь)

Диаграммы распределения выработки и потерь

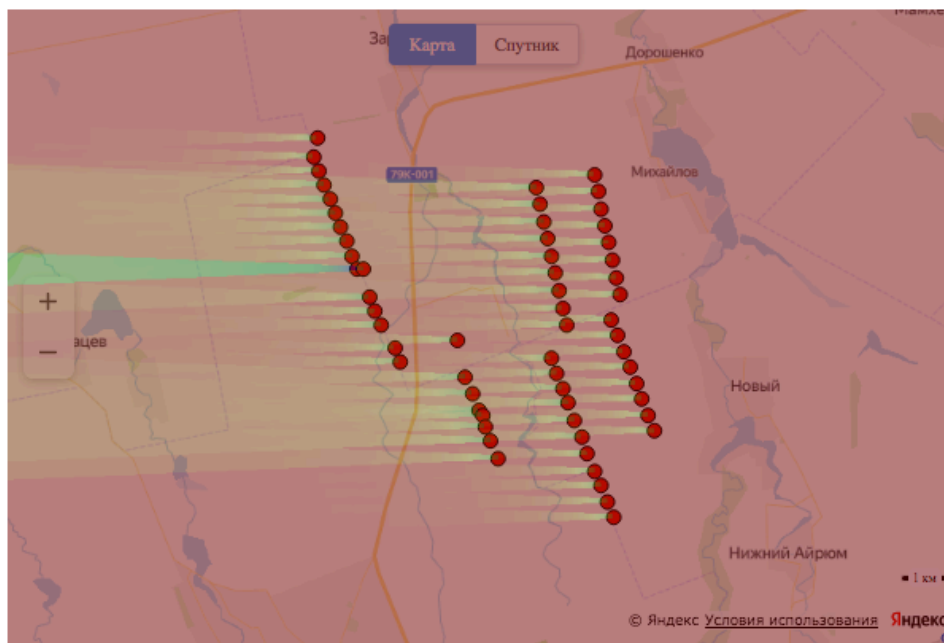


Расчет потерь на затенение с использованием Wind Energy PRO



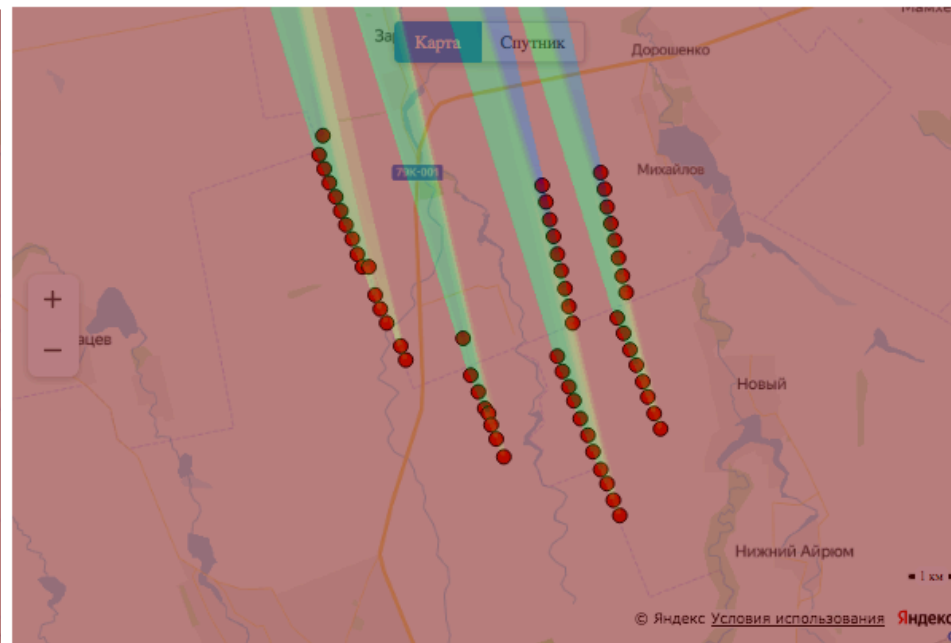
Ситуация с наименьшими аэродинамическими потерями

Тепловая карта скорости ветра для выбранного наблюдения



Ситуация с наибольшими аэродинамическими потерями

Тепловая карта скорости ветра для выбранного наблюдения



Оценка качества расчёта выработки ВЭС:

Цель анализа и структура моделей



Оценка качества расчётной модели выработки ВЭС по четырём конфигурациям:

Цель: Верифицировать точность расчётов выработки ВЭС на этапе ТЭО по сравнению с фактическими данными за год.

Сравниваемые варианты расчета:

При расчете рассматривается эмпирическая модель спутной струи (N.O. Jensen) и её практическая имплементация (I. Katić) с соответствующей схемой расчета выработки ВЭС с учетом аэродинамического затенения (см. слайд 26).

Сравниваемые варианты расчета:

Вариант	Учет плотности воздуха (по T, P)	Сезонная шероховатость поверхности
1	нет	да
2	нет	нет
3	да	да
4	да	нет

Фактические данные:

почасовая выработка действующей ВЭС, разбитая по очередям.

Инструмент расчёта:

собственная САПР (Wind Energy PRO) на базе физико-географического моделирования (аналог WindPRO).

Оценка качества расчёта выработки ВЭС: Ключевые метрики качества моделирования



Сравнение вариантов расчёта: метрики точности:

Метрика	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4
Отклонение по выработке, %	−1,65	−1,70	−0,49	−0,54
NMBE % (ср. часовое откл.)	−0,38	−0,39	−0,11	−0,12
NMAE % (норм. ошибка)	13,62	13,62	13,75	13,75
NRMSE % (норм. СКО)	19,61	19,61	19,77	19,76
R ² (коэффициент детерминации)	0,496	0,497	0,488	0,488

Выводы:

- Варианты с учётом плотности воздуха (3, 4) дают значительно меньшее отклонение по годовой выработке.
- Исключение сезонной шероховатости (варианты 2, 4) даёт небольшое улучшение формы профиля (R² и NRMSE).
- Лучший компромисс по точности и смещению - вариант 3.

Оценка качества расчёта выработки ВЭС: Применимость модели и рекомендации



Выводы и рекомендации по расчетной модели:

Точность расчёта выработки электрической мощности ВЭС:

- **Систематическая ошибка** (MBE, |bias|) расчёта выработки в лучших вариантах (3, 4) не превышает 0,5 % --> соответствует отраслевым требованиям к P50 (|bias| ≤ 2 %).
- **Форма почасового профиля** передаётся с достаточно удовлетворительной точностью: $NRMSE \approx 20\%$, $R^2 \approx 0,5$ ($|r| \geq 0,7$) – в пределах типовых значений при расчётах по NWP-данным (ЧПП, численные прогнозы погоды).

Модель учитывает:

- (в зависимости от варианта) изменение плотности воздуха по температуре и давлению $\rho(T, P)$;
- (в зависимости от варианта) сезонную шероховатость подстилающей поверхности Z_0 ;
- пространственную структуру ВЭС, аэродинамическое затенение вызываемое спутными струями ВЭУ (wake effect).
- Полученные значения метрик сопоставимы с результатами ведущих САПР (WindPRO, WAsP).

Вывод: Разработанная авторами САПР для ветроэнергетических расчетов пригодна для применения на этапе ТЭО и формирования исходных данных для bankable Energy Yield Assessment (EYA).

Выводы: Комплексность и научная новизна подхода



Коллективом авторов была разработана автоматизированного расчета аэродинамического затенения ВЭС с учетом влияния различных факторов:

Комплексная система расчета аэродинамического затенения охватывает весь цикл: от построения карты затенения (Wake Map) до вычисления входной скорости (ВЭУ) и генерируемой мощности ВЭУ. Используются модели различной сложности: от эмпирических (Jensen) до численных RANS (Ainslie, Larsen), что позволяет адаптироваться под требования точности и доступных вычислительных ресурсов.

- **Разработана методика учета шероховатости подстилающей поверхности (Z_0) в течение года.** Внедрены два метода оценки:
 - По вертикальному профилю ветра (логарифмическая модель на основе измерений скорости ветра на нескольких высотах);
 - По турбулентности (с использованием интенсивности турбулентности и эмпирической константы A_x).

Пример верификации по параметру высоты снежного покрова (sss) позволил выделить коридор наиболее точных вариантов: турбулентный подход с A_x в рекомендованном диапазоне 0,9-0,7 (ниже рекомендованного по DS472) для среднемесячных значений.

- **Учет $C_t(V)$ — зависимости коэффициента тяги от скорости ветра — реализован через численный метод восстановления на базе мощностной кривой $N(V)$ и теории импульса.** Используется последовательное определение коэффициента торможения a и применение формул BEM с поправками. Программа WTCurves успешно апробирована на нескольких моделях ВЭУ, в том числе мощных офшорных установках (GE Haliade-X 12 MW, SG 10.0-193).

Выводы: Имплементация и практические применения



- Выполнена программная реализация расчета Wake Map с расчётом перекрытия ометаемых площадей по координатам ВЭУ, направлению ветра и расширению струй. Алгоритмы *getEffects()*, *getOverlapParams()* и *circleOverlap()* реализуют геометрию наложения спутных струй с учётом реального рельефа и координат.
- Имеется возможность выбора нескольких моделей спутной струи ВЭУ (в базовом варианте – эмпирическая модель N.O. Jensen и её практическая имплементация I. Katić).
- **Практическая применимость:** Система применима как на этапе микросайтинга (оптимизация размещения ВЭУ), так и в качестве физического блока в гибридных прогнозных моделях генерации. Учет Z_0 и $C_t(V)$ обеспечивает точность АЕР и оценки потерь.
- **Разработанная программа «Wind Energy PRO» :**
 - предоставляет доступную и точную альтернативу другим программным продуктам для расчетов в ветроэнергетике, таким как WindPRO.
 - модульная структура, минимальные требования к серверу и удобный интерфейс делают программный комплекс подходящим для использования как специалистами, так и образовательными учреждениями.
 - апробация программы на данных Адыгейской ВЭС подтвердила способность программного комплекса точно моделировать выработку энергии

Спасибо за внимание!