

# **Лекционная презентация по теме**

**«Факторы, влияющие на  
энергетические показатели ВЭУ и  
ВЭС»**

**по курсу «Проектирование и  
эксплуатация ВЭС»**

**Разработчик ст.преп. Дерюгина Г.  
В.**

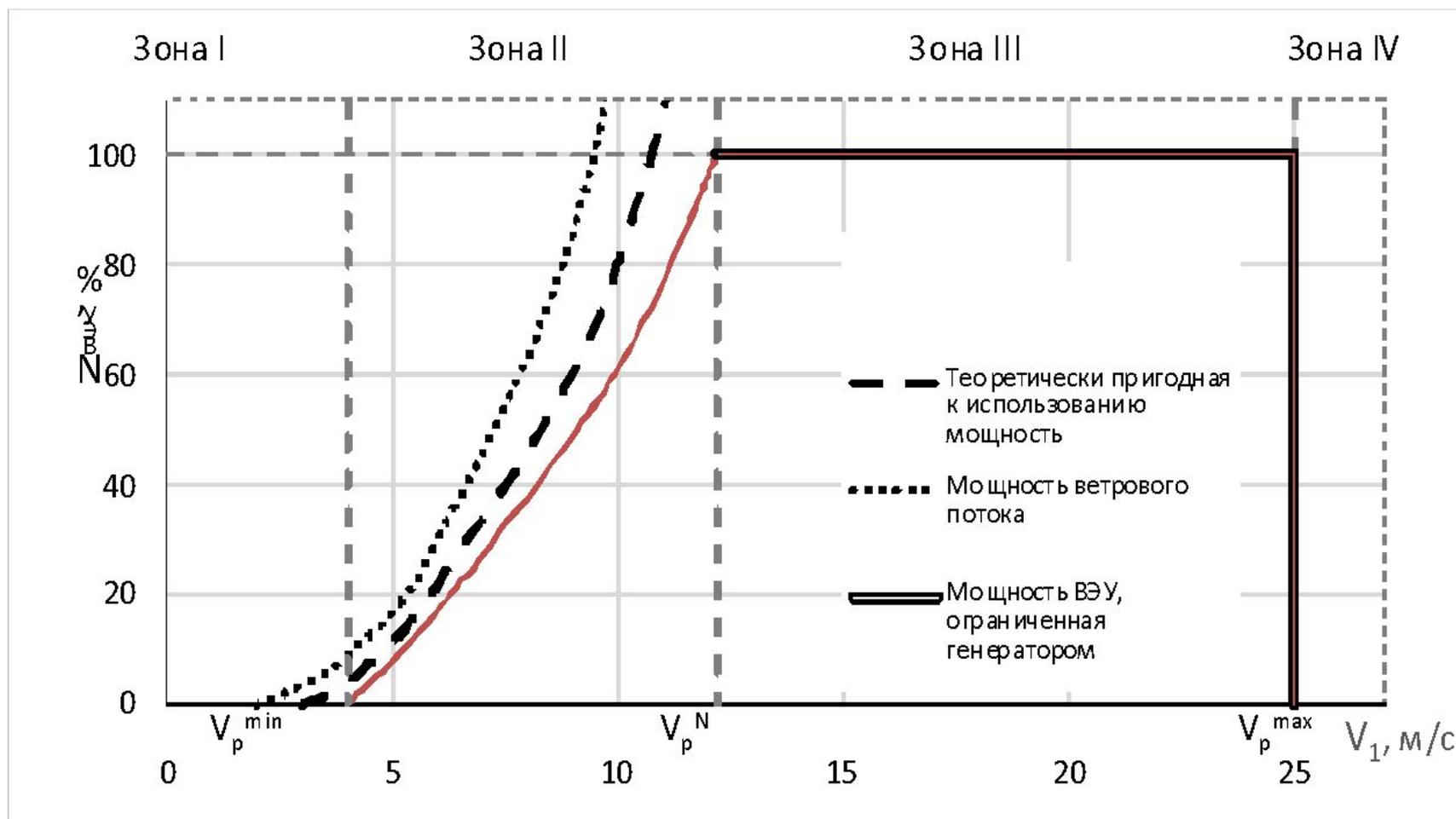
**2021 г.**



# Содержание:

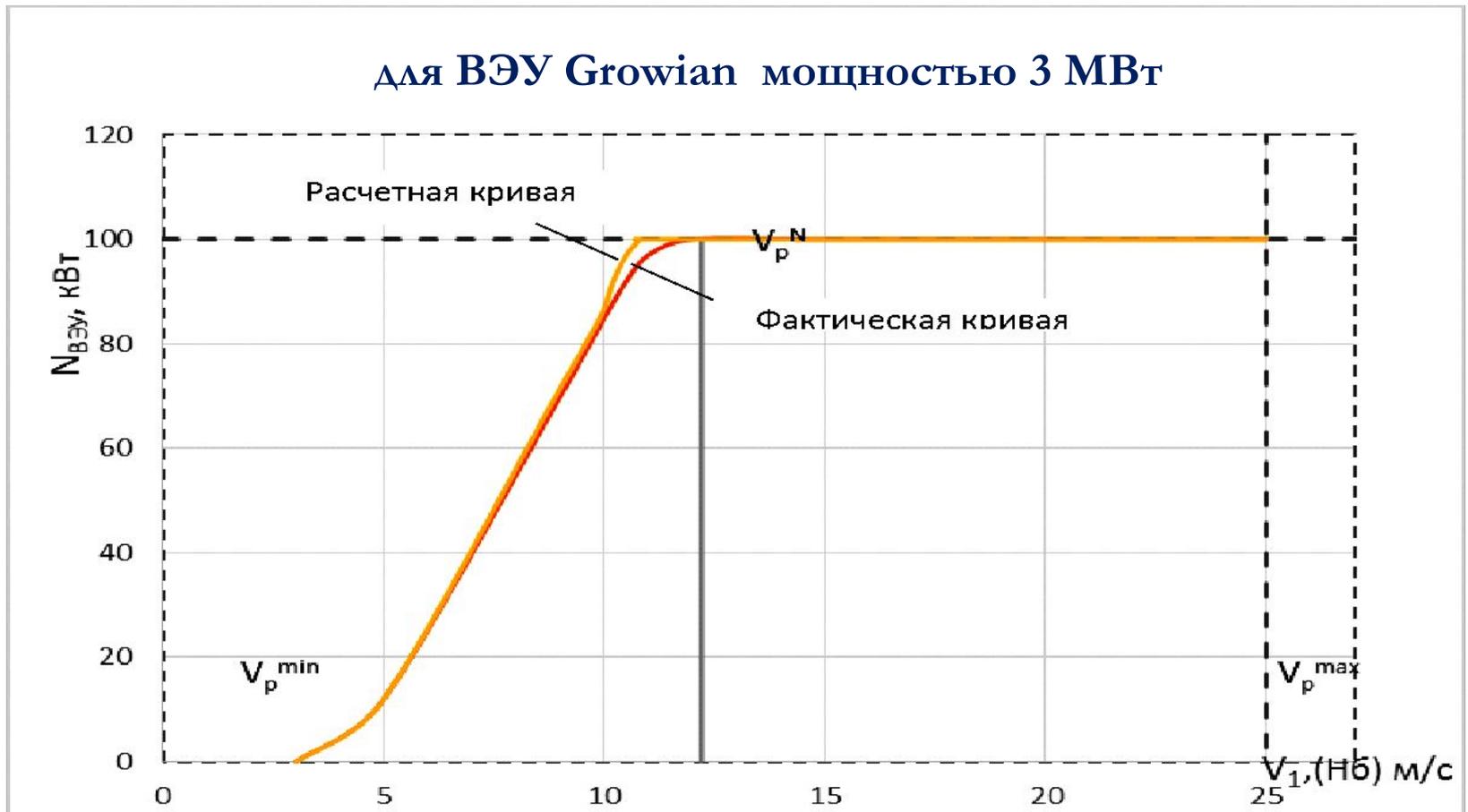
1. Модельная и натурная мощностные характеристики ВЭУ  $N(v)$
2. Влияние различных факторов на энергетические показатели ВЭУ

# Модельная мощностная характеристика ВЭУ

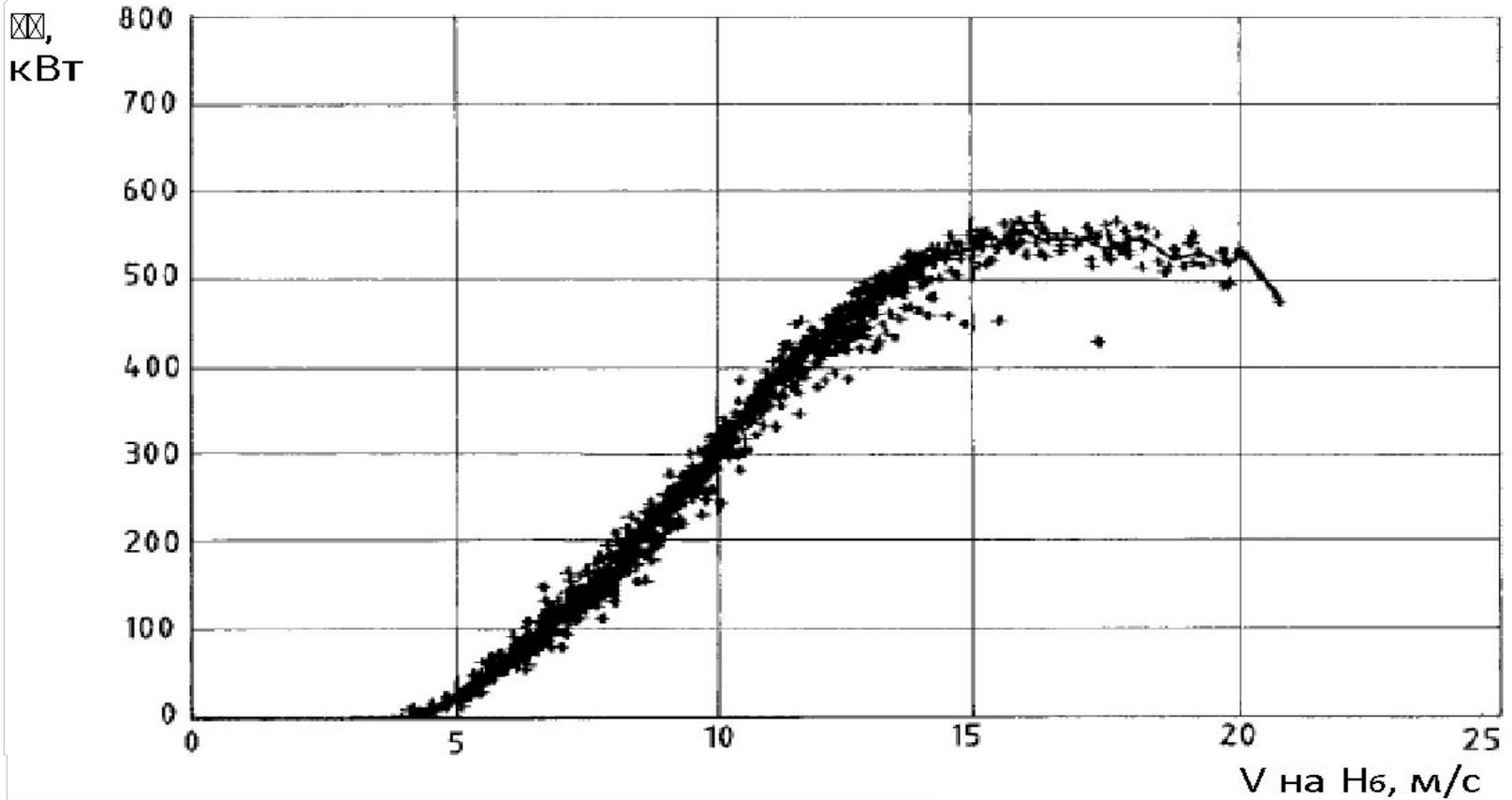


# Модельная и натурная $N_{вэу}(V)$

для ВЭУ Growian мощностью 3 МВт



# Натурная мощностная характеристика ВЭУ со *stall*-регулированием (по ГОСТР54418.12 или IEC 61400-12)



# **Построение натурной мощностной характеристики ВЭУ**

Проводится по эксплуатационным данным ВЭУ в соответствии с  
**ГОСТ Р 54418.12.2-2013**

(Верифицированный стандарт IEC61400-12)

**Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 12-2. Измерение показателей мощности ветроэнергетической установки с использованием анемометра, установленного на гондоле**

# Требования к исходным данным для построения натурной мощностной характеристики ВЭУ:

- 10-и минутные данные;
- данные, соответствующие нормальному рабочему режиму ВЭУ, т.е. исключаются периоды, когда:
  - ВЭУ не работала из-за неисправности системы;
  - Величина скорости ветра находится за пределами рабочего диапазона ВЭУ;
  - ВЭУ остановлена вручную, находится в тестовом режиме или режиме обслуживания;
  - ВЭУ имела ухудшение рабочих характеристик (снижение крутящего момента);
  - Вводились ограничения мощности ВЭУ;
  - Имели место возможные обледенения.

# Количество ошибок, относящихся к различным системам ВЭУ Komai KWT300, и продолжительности простоев по данным ошибкам (эксплуатационные данные за 2016 г. ВДК в п. Усть-Камчатск)

Система	Кол-во ошибок, шт			Кол-во ошибок, % от общего кол-ва			Продолжительность простоя из-за ошибки, ч		
	ВЭУ №1	ВЭУ №2	ВЭУ №3	ВЭУ №1	ВЭУ №2	ВЭУ №3	ВЭУ №1	ВЭУ №2	ВЭУ №3
Установка ВЭУ на ветер	248	171	257	15.2	10.0	15.9	20	78	3
Предохранительная цепь	46	112	42	2.8	6.6	2.6	88	45	11
Контроллер лопастей	18	5	0	1.1	0.3	0.0	0	4	0
Гидравлическая система	188	111	253	11.5	6.5	15.7	181	93	21
Инвертер	88	145	67	5.4	8.5	4.2	70	25	17
Сеть	150	140	184	9.2	8.2	11.4	0	0	0
ИБП	183	23	162	11.2	1.4	10.0	0	1	0
Условия окружающей среды	27	26	28	1.7	1.5	1.7	13	0	1
Холодный климат	101	0	50	6.2	0.0	3.1	76	0	48
Мониторинг вибраций	104	282	136	6.4	16.6	8.4	1	2	2
Управление питанием	3	2	4	0.2	0.1	0.2	0	0	0
Останов	17	38	8	1.0	2.2	0.5	0	0	0
Системные коды состояния	71	179	42	4.4	10.5	2.6	0	0	0
Другие	..	..	...	...	..	..	..	..	..
Общие статус коды	279	385	260	17.1	22.6	16.1	1 574	801	991
Итого	1 629	1 703	1 613	-	-	-	2 028	1 050	1 094
							23%	12%	12%

# Метод «бинов»

Расчет средних значений нормализованной скорости ветра и нормализованной генерируемой мощности для каждого бина 0,5 м/с (или 1 м/с) скорости ветра проводится по выражениям:

$$\bar{v}_{\text{н}} = \frac{1}{N_{\text{д}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{д}}} v_{\text{н},i}$$

$$\bar{P}_{\text{н}} = \frac{1}{N_{\text{д}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{д}}} P_{\text{н},i}$$

где  $v_{\text{н}}$  и  $P_{\text{н}}$  – соответственно нормализованная и усредненная скорость ветра и генерируемая мощность в бине  $\Delta v$ ,  $v_{\text{н},i}$  и  $P_{\text{н},i}$  – соответственно нормализованная скорость ветра набора данных  $i$  в бине  $\Delta v$  нормализованная генерируемая мощность по набору данных  $i$  в бине  $\Delta v$ ,  $N_{\text{д}}$  – число наборов данных по 10-ь мин в бине  $\Delta v$

## Требования к бином:

- каждый бин включает минимум 30 минут выборочных данных;
- база данных включает минимум 180 ч выборочных данных.

# Пример 1

**Дано:** ряд 10-и минутных наблюдений за скоростью ветра и мощностью ВЭУ

$V, \text{ м/с}$	5	6	6,5	5,5	7	8	6,5
$N_{\text{вэу}}, \text{ кВт}$	95	110	120	110	120	130	110

**Определите:**

- а) Значение мощности ВЭУ по натурной мощностной характеристике при скорости ветра 6,5 м/с;
- б) Значение скорости ветра по натурной мощностной характеристике при мощности ВЭУ 114 кВт.

# Решение примера 1

## Определение точек натурной характеристики

V, м/с	5	6	6,5	5,5	7	8	6,5
Nвэу, кВт	95	110	120	110	120	130	110

### Диапазон 5-6 м/с

V, м/с	5	5,5	6	<b>5,5</b>
Nвэу, кВт	95	110	110	<b>105</b>

### Диапазон 6-7 м/с

V, м/с	6	6,5	7	6,5	<b>6,5</b>
Nвэу, кВт	110	120	120	110	<b>115</b>

### Диапазон 7-8 м/с

V, м/с	7	8	<b>7,5</b>
Nвэу, кВт	120	130	<b>125</b>

### Натурная характеристика

V, м/с	5,5	6,5	7,5
Nвэу, кВт	105	115	125

### Ответ

а) Значение мощности ВЭУ по натурной мощностной характеристике при скорости ветра 6,5 м/с – 115 кВт

б) Значение скорости ветра по натурной мощностной характеристике при мощности ВЭУ 114 кВт – 6,4 м/с

# Факторы, влияющие на энергетические показатели ВЭУ

1. Плотность воздуха
2. Размеры ВЭУ (диаметр рабочего колеса  $D_{рк}$  и высота башни  $H_б$  )
3. Модель вертикального профиля ветра (ВПВ)
4. Обледенение

# Среднемноголетняя плотность воздуха

определяется по формулам:

- плотность сухого воздуха  $\rho$  может быть определена путем применения закона идеального газа:

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

где  $t^0$  – температура окружающей среды в градусах Кельвина,  $P$  – атмосферное давление в кПа зависит от высоты над уровнем моря и определяется по эмпирической формуле:

$$P = 101,29 - 0,011837 \cdot \nabla + 4,793 \cdot 10^{-7} \cdot \nabla^2$$

где  $\nabla$ , м – высота над уровнем моря.

## Пример 2

Требуется ли коррекция на плотность воздуха мощностной характеристики ВЭУ для условий точки А:  $\nabla=2000$  м и средненоголетняя температура  $35^{\circ}\text{C}$ ?

Ответ обосновать расчетом.

## Решение примера 2

Давление воздуха:

$$P_1(\nabla_1) = 101,29 - 0,011837 \cdot 2000 + 4,793 \cdot 10^{-7} \cdot 2000^2 = 79,53 \text{ кПа.}$$

Плотность воздуха:

$$\rho(t^0, \nabla) = 3,4837 \cdot \frac{79,53}{(273 + 35)} = 0,899 \text{ кг/м}^3.$$

Отклонение плотности воздуха в точке А от стандартного значения:

$$\Delta\rho = 1,226 - 0,899 = 0,32 \text{ кг/м}^3 > 0,05 \text{ кг/м}^3.$$

**Ответ: Коррекция мощностной характеристики требуется.**

# Коррекция модельной мощностной характеристики ВЭУ на плотность воздуха

**С регулируемыми лопастями:**

Производится пересчет скорости ветра по формуле:

$$v_1(v_1) = v_0(v_0) \left( \frac{\rho_0(v_0, \rho_0)}{\rho_1(v_1, \rho_1)} \right)^{1/3}.$$

**С нерегулируемыми лопастями:**

Производится пересчет мощности по формуле:

$$N_1 = N_0 \frac{\rho_1}{\rho_0}$$

# Пример 3

**Дано:** Мощностная характеристика ВЭУ модели АВЭУ-30 для стандартных условий в таблице:

N, кВт		0,0	0,0	1,0	2,3	4,7	8,2	13,0	24,0	30,0	30,0	30,0
V, м/с	$\Delta=0$ м, $t=15^{\circ}\text{C}$	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	....	25,0

**Проведите коррекцию** мощностной характеристики ВЭУ модели АВЭУ-30 на реальные условия площадок:

- а)  $\nabla=2000$  м и среднегодовая температура -  $+20^{\circ}\text{C}$ ;
- б)  $\nabla=0$  м и среднегодовая температура -  $-20^{\circ}\text{C}$ .

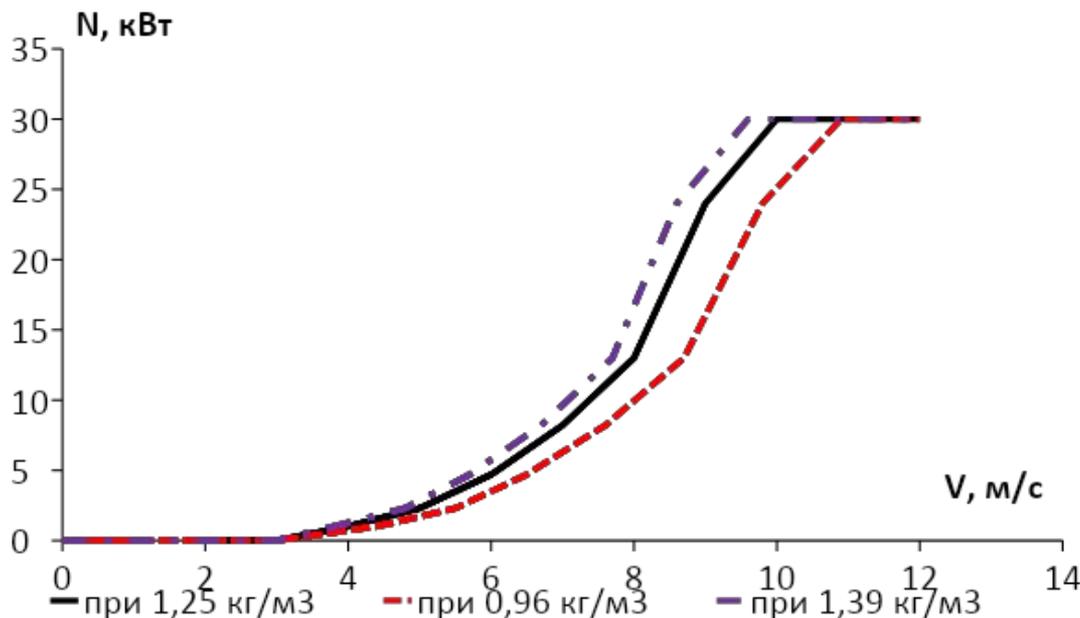
# Решение примера 3:

Пересчет энергетической характеристики ВЭУ с регулируемыми лопастями с поправкой на плотность воздуха

$$N_1(N_1) = N_0(N_0) \left( \frac{\rho_0(\rho_0, \rho_0)}{\rho_1(\rho_1, \rho_1)} \right)^{1/3}$$

Энергетические характеристики модели АВЭУ-30 при разных значениях  $\rho$

N, кВт		0,0	0,0	1,0	2,3	4,7	8,2	13,0	24,0	30,0	30,0	30,0
V, м/с	$\Delta=0$ м, $t=15^{\circ}\text{C}$ ; $\rho=1,25$ кг/м <sup>3</sup>	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	...	25,0
	$\Delta=2000$ м, $t=20^{\circ}\text{C}$ ; $\rho=0,96$ кг/м <sup>3</sup>	0,0	3,0	4,4	5,5	6,5	7,6	8,7	9,8	10,9	...	25,0
	$\Delta=0$ м, $t=-20^{\circ}\text{C}$ ; $\rho=1,39$ кг/м <sup>3</sup>	0,0	3,0	3,8	4,8	5,7	6,7	7,7	8,6	9,6	...	25,0



Влияние плотности воздуха на мощностную характеристику ВЭУ модели АВЭУ-30

# Пример 4

**Дано:** Мощностная характеристика ВЭУ модели Е31-20 для стандартных условий представлена в таблице:

V, м/с	1	3	4	6	8	10	12	14	17	19	21	23	26
N, кВт	0	0	2	16	36	50	58	60	55	47	36	27	0

**Проведите коррекцию** мощностной характеристики ВЭУ модели Е31-20 на реальные условия площадок:

- а)  $\nabla=2000$  м и среднегодовая температура -  $+20$  °С;
- б)  $\nabla=0$  м и среднегодовая температура -  $-20$  °С.
- в)  $\nabla=50$  м и среднегодовая температура -  $+5$  °С

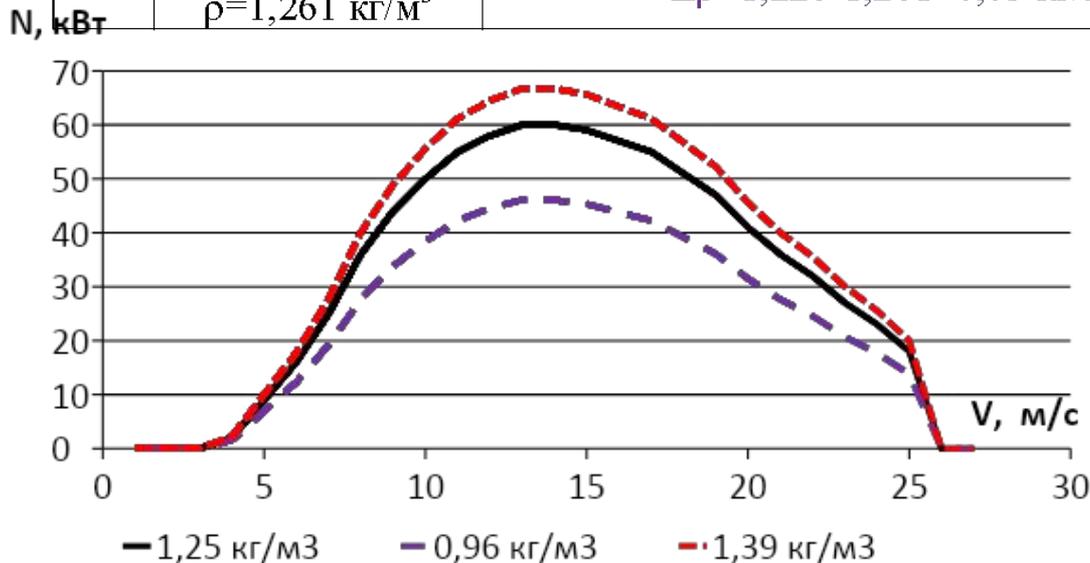
# Решение примера 4:

Пересчет энергетической характеристики ВЭУ с нерегулируемыми лопастями с поправкой на плотность воздуха:

$$N_1 = N_0 \frac{\rho_1}{\rho_0}$$

Энергетические характеристики модели E31-20 при разных значениях  $\rho$

V, м/с		1	3	4	6	8	10	12	14	17	19	21	23	26
N, кВт	$\Delta=0$ м, $t=15^{\circ}\text{C}$ ; $\rho=1,25$ кг/м <sup>3</sup>	0	0	2	16	36	50	58	60	55	47	36	27	0
	$\Delta=2000$ м, $t=20^{\circ}\text{C}$ ; $\rho=1,01$ кг/м <sup>3</sup>	0	0	1,5	12,3	27,6	38,4	44,5	46,1	42,2	36,1	27,6	20,7	0
	$\Delta=0$ м, $t=-20^{\circ}\text{C}$ ; $\rho=1,39$ кг/м <sup>3</sup>	0	0	2,2	17,8	40,0	55,6	64,5	66,7	61,2	52,3	40,0	30,0	0
	$\Delta=50$ м, $t=5^{\circ}\text{C}$ ; $\rho=1,261$ кг/м <sup>3</sup>	$\Delta\rho=1,226-1,261=0,03$ кг/м <sup>3</sup> , коррекция не требуется												

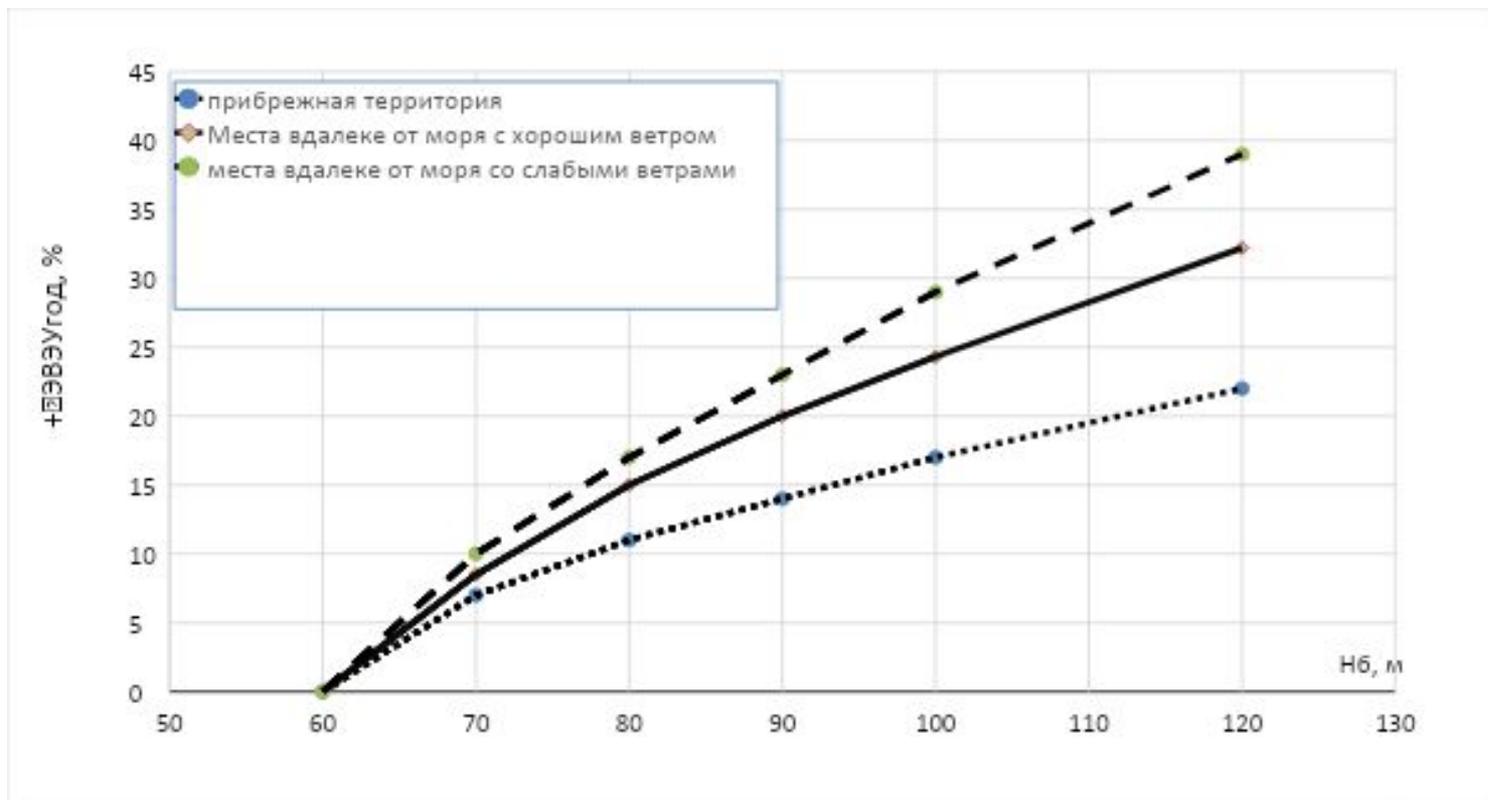


**Влияние плотности воздуха на мощностную характеристику ВЭУ модели E31-20**

# Влияние высоты башни на годовую выработку ВЭУ

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}^{i+1} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}^{i+1} - \mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}^i}{\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}^i} \times 100\%,$$

где  $i$  – высота от поверхности земли,  $\mathcal{E}_i$  – годовая выработка ВЭУ на высоте  $i$ .



**Прирост  $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}^{\text{год}}$  (%) при изменении  $H_6$  от 80 до 120 м для прибрежных и внутренних территорий на суше**

# Пример 5

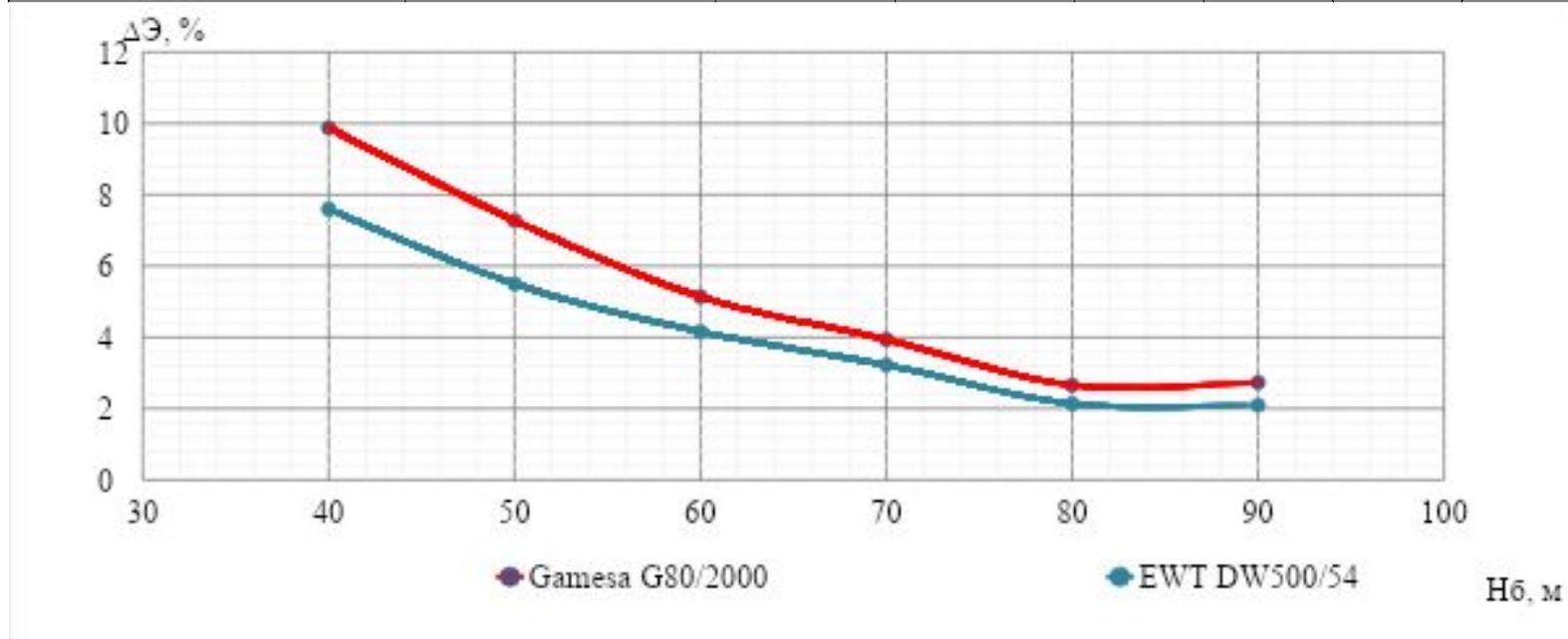
**Дано:** Значения годовой выработки двух моделей ВЭУ с разной высотой башни: Gamesa G80/2000, EWT DW 500/54 приведены в таблице:

Фирма	Модель	Высота башни $H_6=i$ , м						
		30	40	50	60	70	80	90
		Годовая выработка $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}$ , МВт·ч						
Gamesa	G80/2000	6194,3	6805,9	7301,1	7676,6	7979,1	8191,1	8415,1
EWT	DW 500/54	2130,9	2292,8	2418,9	2519,5	2600,8	2656,5	2718,1

**Проанализируйте** относительный прирост годовой выработки по высоте башни.

# Решение примера 5: Относительный прирост годовой выработки двух типов ВЭУ при увеличении высоты башни $H_6$

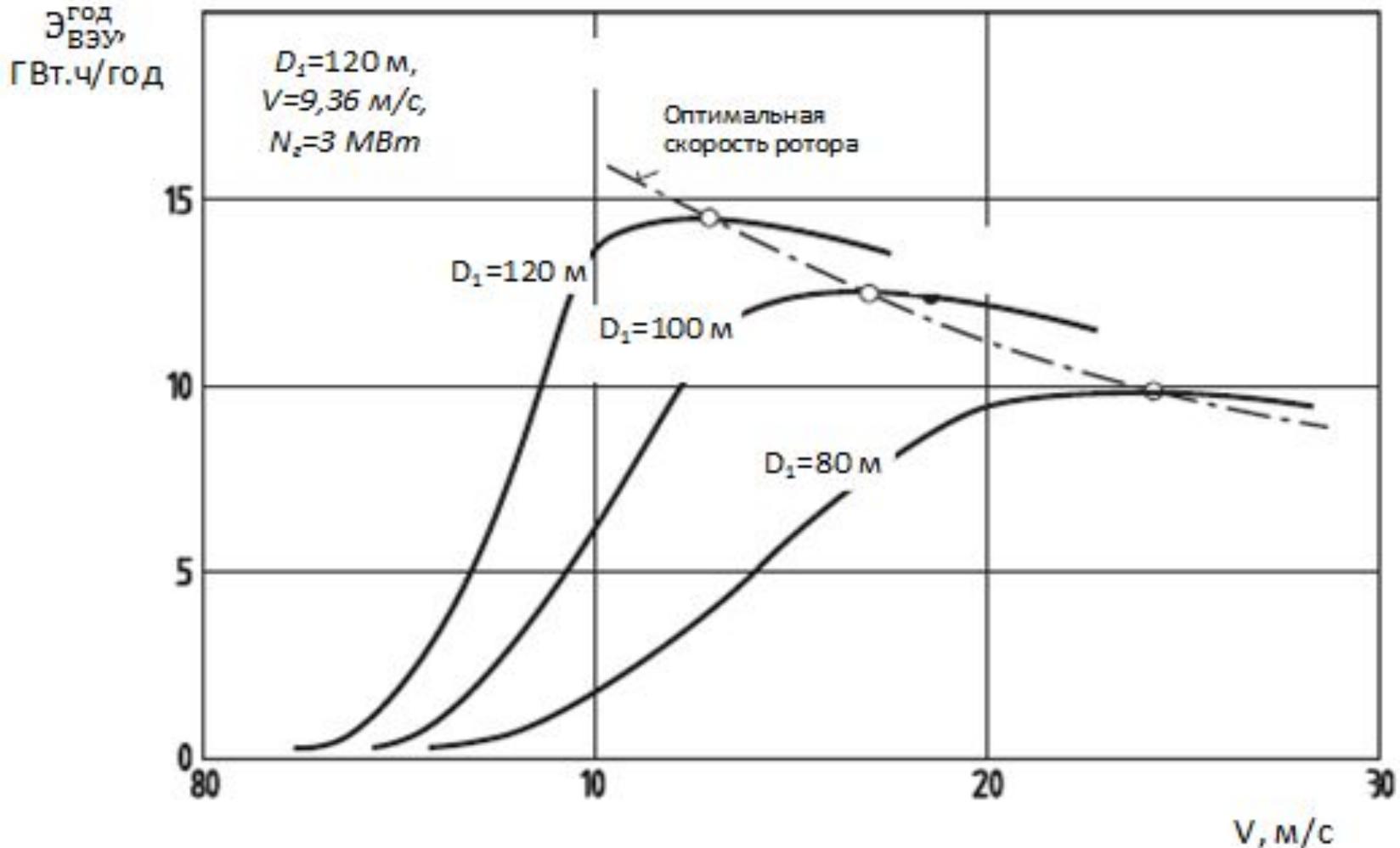
Производитель	Модель	Высота башни $H_6=i, \text{ м}$					
		40	50	60	70	80	90
		относительное изменение $\Delta \mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}, \%$					
<b>Gamesa</b>	G80/2000	9,9	7,3	5,1	3,9	2,7	2,7
<b>EWT</b>	DW 500/54	7,6	5,5	4,2	3,2	2,1	2,1



**Вывод:** Неэффективно увеличение высоты башни ВЭУ более 80 м.

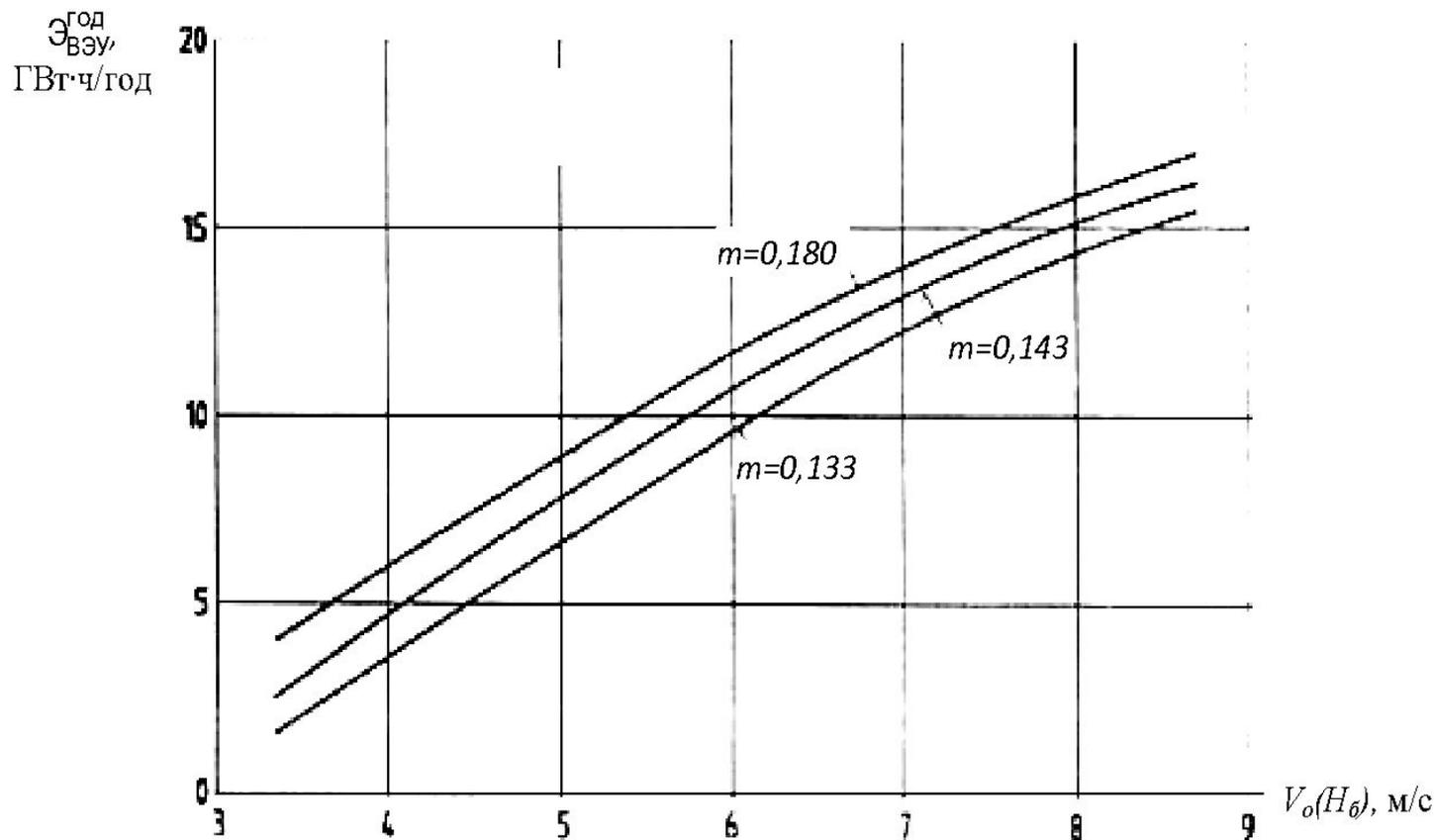
# Влияние диаметра ВК на годовую выработку ВЭУ

на примере ВЭУ модели Growian в 3 МВт



Причина уменьшения  $E_{\text{ВЭУ}}$  в основном объясняется уменьшением ометаемой площади ротора ВК при уменьшении  $D_1$  (м).

# Влияние модели вертикального профиля ветра на годовую выработку ВЭУ на примере ВЭУ типа Growian в 3 МВт



Увеличение показателя степени ( $m$ ) с 0,133 до 0,180 в зависимости от  $V_0$  в диапазоне от 4 до 8 м/с ведет к росту  $\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}}^{\text{год}}$  примерно на 7%÷11%

# Пример 6: Влияние учета внутригодового изменения показателя степени (по отношению к среднегодовому значению $m=0,2$ ) на месячные выработки ВЭУ на площадке расположения демонтированной Куликовской ВЭС

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
$m$ , о.е.	0,19	0,19	0,19	0,22	0,23	0,26	0,20	0,22	0,19	0,17	0,16	0,17	0,2
$\Delta m$ , %	-5,1	-4,8	-3,2	9,25	17,4	29,82	2,06	10,9	-6,8	-17	-19	-15	-
$\mathcal{E}_{\text{год}}$ при $m=0,2$ , МВт.ч	616	801	783	594	827	705	617	488	602	562	616	820	8031
$\mathcal{E}_{\text{год}}$ при $m=\text{var}$ , МВт.ч	600	798	780	629	879	752	617	515	585	501	548	762	7966
$\Delta \mathcal{E}$ , %	2,8	0,5	0,5	-5,6	-5,9	-6,2	0,0	-5,3	3,0	12,0	12,2	7,7	-0,8

