



## АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ И ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ОФФШОРНЫХ ВЕТРОПАРКОВ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Д.К. Кугучева, студентка гр. 15-ЭЭ, kuguchevad@yandex.ru

М.С. Харитонов, к.т.н., доцент, maksim.haritonov@klgtu.ru  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

Представлены результаты анализа предпосылок и общемировых тенденций развития ветроэнергетики. Рассмотрено современное состояние и тенденции развития оффшорных ветропарков. На примере энергосистемы Германии выполнен анализ ряда ветропарков морского базирования. Дана оценка перспектив применения оффшорной ветроэнергетики в прибрежных районах Калининградской области.

*ветроэнергетическая установка, оффшорный ветропарк, ветропарк морского базирования, ветропотенциал, возобновляемые источники энергии, экологические аспекты*

К основным тенденциям развития современной энергетики относятся сокращение объемов добычи и использования невозобновляемых энергетических ресурсов, улучшение экологической обстановки и энергосбережение. По предварительным расчетным данным, проведенным ООН, обеспеченность ресурсами нефти, газа и угля на 2017 г. составила соответственно 48, 52,7 и 250 лет [1], что указывает на необходимость перехода к использованию альтернативных источников энергии. Второй причиной данной тенденции является угроза парникового эффекта, основной антропогенный источник которого - сжигание ископаемого топлива и выделение при этом большого количества углекислого газа. Так, по данным ежегодного отчета «BP Statistical Review of World Energy» [2], мировой объем выбросов углекислого газа в 2017 г. составил 33,4 млрд. т (рис. 1).

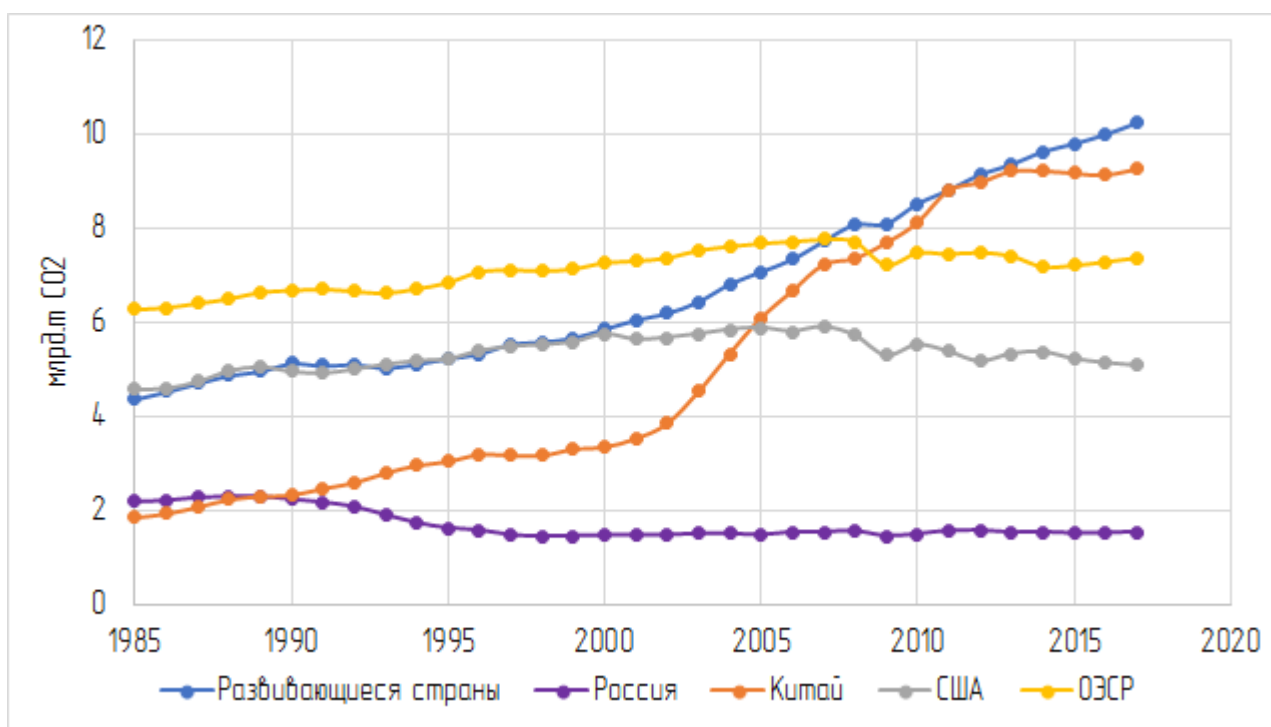


Рисунок 1 – Динамика роста выбросов CO<sub>2</sub> по ведущим странам и регионам мира

Анализ результатов исследований (рис. 2), выполненных центром климатического прогнозирования (Хэдли, Великобритания), показывает, что согласно сценарию, при котором никаких активных мероприятий по снижению выбросов углекислого газа проводиться не будет, увеличение выбросов CO<sub>2</sub> к 2100 г. утроится, что приведет к глобальным изменениям климата – увеличению средней годовой температуры, вызывающей таяние ледников и разбалансировку природных процессов.

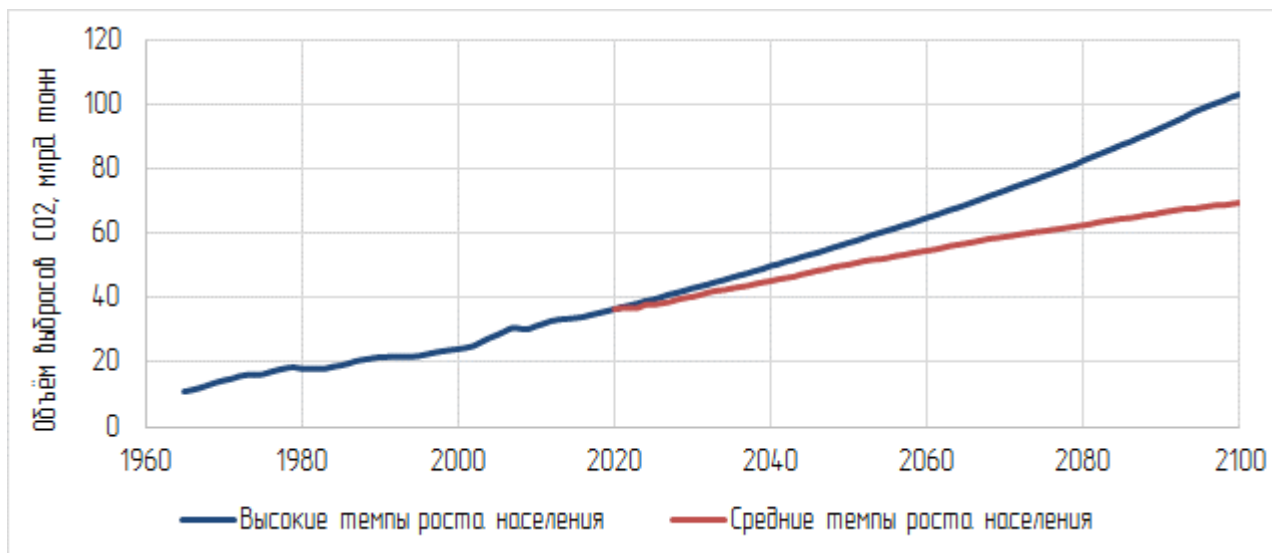


Рисунок 2 – Прогноз увеличения выбросов CO<sub>2</sub> в долгосрочной перспективе

Для стимулирования сокращения выбросов углекислого газа 195 государств подписали Парижское соглашение по климату (12.12.2015 г.) [3], нацеленное на удержание прироста глобальной средней температуры ниже 1,5 град к 2100 г. по сравнению с 1900. Поскольку наибольшая доля выбросов парниковых газов приходится на энергетический сектор (82,3%) [4], то одним из основных путей решения данной задачи является изменение структуры топливно-энергетического баланса за счет расширения использования альтернативных (возобновляемых) источников энергии.

Одним из перспективных направлений применения возобновляемых источников энергии является использование кинетической энергии ветра, для преобразования которой в электрическую используются ветроэнергетические установки (ВЭУ) (табл. 1), объединяемые в ветроэлектростанции (ВЭС) берегового и шельфового (оффшорного) размещения [5].

Таблица 1 – Параметры современных ВЭУ

ВЭУ	Мощность, кВт	Скорость ветра, м/с			Тип генератора
		Начальная	Номинальная	Максимальная	
Enercon E126	6000	3	16,5	34	Синхронный
Gamesa G128-5.0MW	5000	2	14	27	Синхронный
Enercon E-126 EP4	4200	3	13,5	34	Синхронный
SWT-4.0-130	4000	5	12	25	Асинхронный
WinWinD WWD-3 D100	3000	4	11,5	25	Синхронный
Leitwind LTW101 3000	3000	3	15	25	Синхронный
Vestas V90	2000	4	13	25	Асинхронный

В период с 2001 по 2017 гг. общая установленная мощность ВЭС выросла более чем в

22 раза, что непосредственно свидетельствует о мировой тенденции к интенсивному развитию ветроэнергетики (рис. 3) [6]. За 2017 г. в эксплуатацию были введены ВЭУ общей мощностью 52,5 ГВт, а суммарная мощность всех ВЭС составила 539,1 ГВт. Ведущей страной по установленной мощности ВЭС является Китай (188,4 ГВт). Второе и третье место занимают США (89,1 ГВт) и Германия (56,1 ГВт) соответственно.

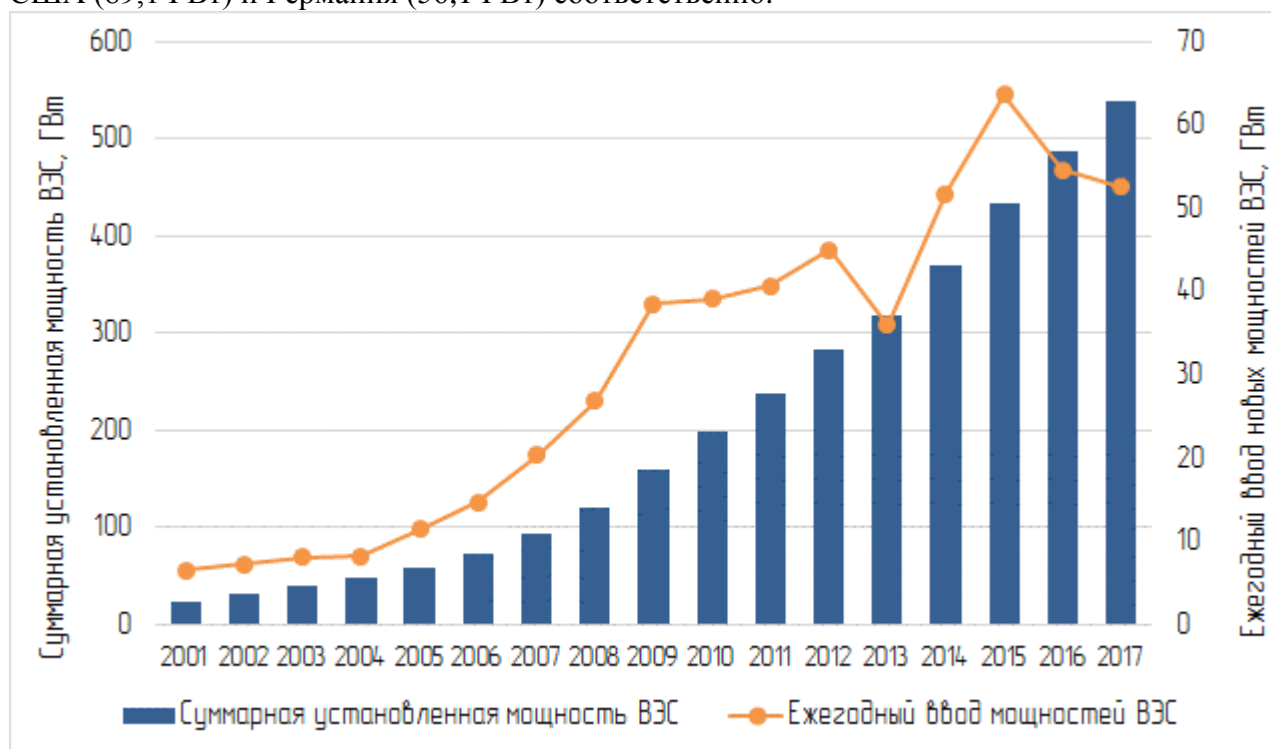


Рисунок 3 – Динамика роста установленной мощности ВЭС в мире

К концу 2017 г. 30 государств, 18 из которых располагаются в Европе (табл. 2), преодолели отметку в 1000 МВт установленной мощности ВЭС. При этом в Европе установленная мощность всех ВЭС на конец 2017 г. достигла 168,7 ГВт, включая 15,8 ГВт оффшорных ВЭУ, а доля производства электроэнергии составила 11,6 % от общего потребления европейских стран. В Дании до 44% производства электроэнергии обеспечивается ВЭУ, в Португалии и Ирландии - до 24%, еще семь европейских стран имеют показатель свыше 10% [6].

Таблица 2 – Установленная мощность ВЭС в странах Европы на конец 2017 г.

Государство	Установленная мощность ВЭС, МВт	Государство	Установленная мощность ВЭС, МВт
Германия	56 132	Дания	5 476
Испания	23 170	Португалия	5 316
Великобритания	18 872	Нидерланды	4 314
Франция	13 759	Ирландия	3 127
Италия	9 479	Румыния	3 029
Турция	6 857	Бельгия	2 843
Швеция	6 691	Австрия	2 828
Польша	5 848	Финляндия	2 071

Оффшорные ВЭС, аналогично наземным, развиваются ускоренными темпами. На сегодняшний день их установленная мощность составляет 3% от общей мощности ВЭС в мире. Прирост мощности в 2017 г. в два раза превысил показатель 2016 г. и достиг 4,3 ГВт, что является свидетельством популяризации чистой энергетики и конкурентоспособности оффшорных ВЭС (рис. 4) [7]. Установленная мощность всех оффшорных ВЭУ по состоянию на

конец 2017 г. составила 18,8 ГВт, 84% из которых (15,8 ГВт) располагаются в водах у побережья 11 европейских стран. Установки в Северном море составляют 71% всей мощности шельфовых ВЭС в Европе. На долю Ирландского и Балтийского морей приходится 16 и 12% установленной мощности соответственно, а Атлантического океана - 1,2% [6].

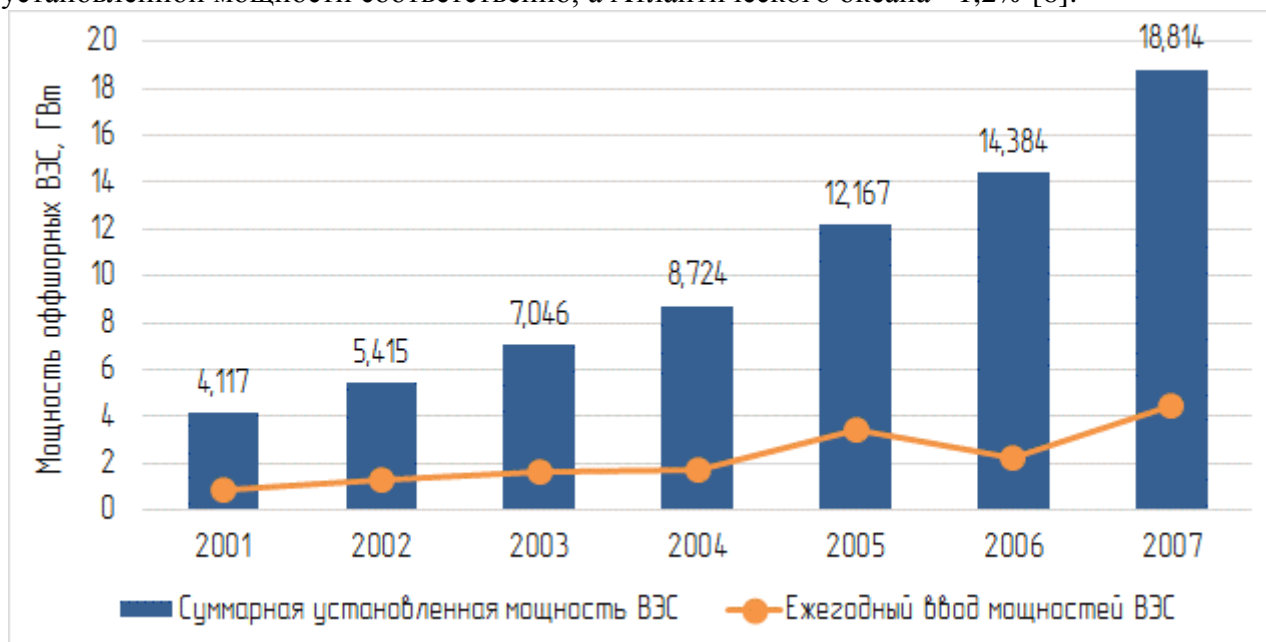


Рисунок 4 – Динамика роста установленной мощности оффшорных ВЭС в мире

В Европе неоспоримым лидером в области ветроэнергетики является Германия, где развитие оффшорных ВЭС началось с установки в 2009 г. первого в стране ветропарка морского базирования Alpha Ventus, включающего 12 турбин Adwen AD 5-116 и Repower 5M мощностью 5 МВт каждая [8]. С того момента данный сектор энергетики развивается ускоренными темпами. Так, к 2017 г. за счет увеличения мощности турбин и числа оффшорных ВЭС их установленная мощность достигла 5,4 ГВт, что соответствует годовой выработке 18 млрд. кВт·ч электроэнергии – 2,7% от всего внутреннего производства, в то время как в 2013 г. данный показатель составлял 0,1%, что делает этот вид электростанций самым быстрорастущим направлением в развитии возобновляемых источников энергии в стране. По данным научно-исследовательского института Fraunhofer IWES, Германия может потенциально установить до 54 ГВт мощности оффшорных ВЭС, что обеспечит выработку около 260 млрд. кВт·ч электроэнергии [9].

С учетом успешного европейского опыта и благоприятного географического расположения в Калининградской области имеются предпосылки к развитию оффшорной ветроэнергетики. В связи с этим в рамках проекта TACIS 2006/214-473 «Перспективы развития морской ветроэнергетики в акваториях Литвы, Польши и Калининградской области» были определены места оптимального размещения ветропарков в прибрежной зоне акватории Балтийского моря (рис. 5). Данные решения основаны на комплексной оценке совокупности географических, технических и экономических факторов, в том числе скорости ветра, глубин и параметров морского дна, наличия элементов инфраструктуры и зон отчуждения, расположения морских путей судодвижения, экономической целесообразности подключения ветропарка к электрическим сетям заданного района.

Средняя скорость ветра (рис. 5) определена как средняя арифметическая величина, полученная из ряда замеров скорости ветра, выполненных через равные интервалы времени в течение заданного периода (1):

$$U_{Mij} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{U_{nmij}}{NM}, \quad (1)$$

где  $U_{nmij}$  – скорость ветра  $m$ -го замера,  $n$ -х суток,  $j$ -го месяца,  $i$ -го года, м/с;  $U$  – средняя скорость движения воздушных масс (градиентного ветра);  $M$  – число замеров в сутки;  $N$  – число суток в месяце.

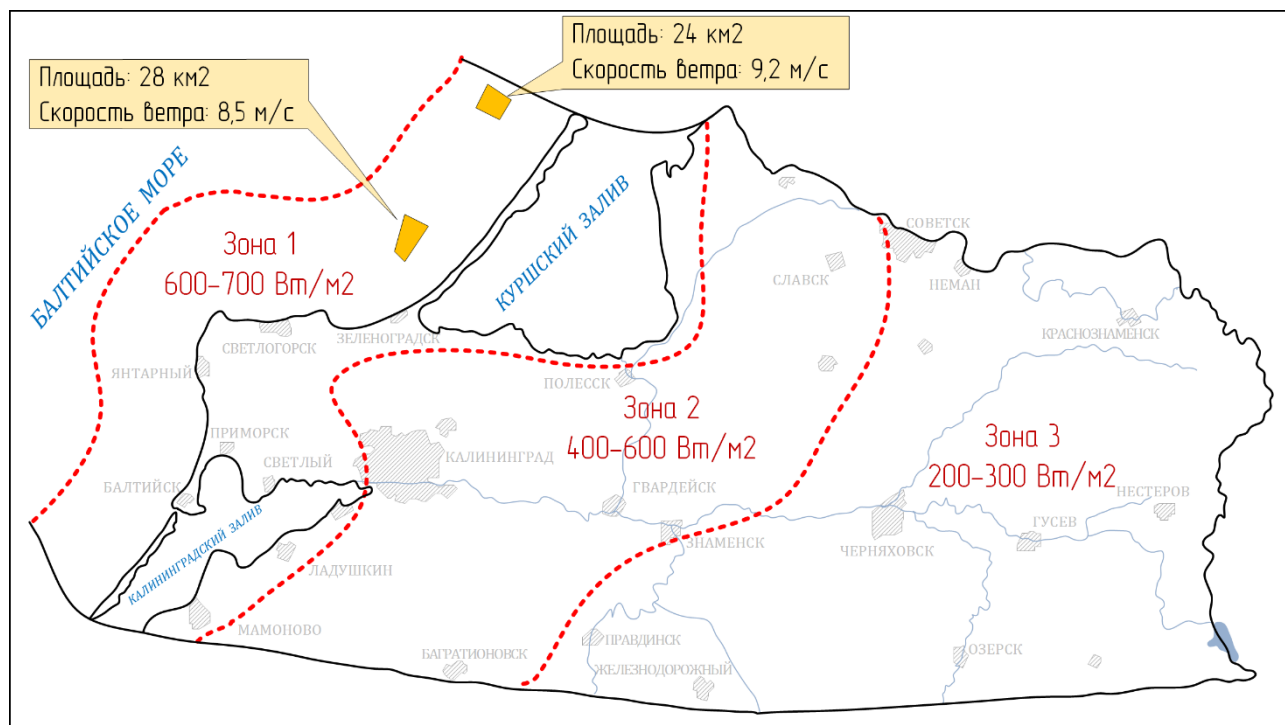


Рисунок 5 – Места размещения ветропарков и зоны равных значений ветропотенциала

Проведенный анализ технических характеристик 20 действующих в Германии оффшорных ВЭС (рис. 6) дал возможность выявить ряд площадок (табл. 3), в наибольшей степени соответствующих параметрам, определенным для акватории Балтийского моря у берегов Калининградской области в рамках проекта TACIS.



Рисунок 6 – Расположение оффшорных ветропарков у побережья Германии

Анализ данных табл. 3 позволяет констатировать, что наиболее схожие показатели с перспективными площадками в Калининградской области имеет расположенный в Балтийском море оффшорный ветропарк EnBW Baltic 2 [10], который включает в себя 80 турбин Siemens SWT-3,6-120 (табл. 4) общей мощностью 288 МВт [11].

Таблица 3- Технические характеристики офшорных ветропарков у побережья Германии

Наименование ветропарка	Мощность, МВт	Площадь, км <sup>2</sup>	Средняя скорость ветра на высоте ступицы, м/с	Глубина залегания турбин, м	Расположение
Калининградская область	-	28	8,5	До 50	Балтийское море
EnBW Baltic 2	288	27	8,83	23- 44	Балтийское море
Wikinger	353,5	32	8,73	37-43	Балтийское море
Butendiek	288	33	9,79	17-22	Северное море
Amrumbank West	302	33	9,78	19-24	Северное море
Borkum Riffgrund 1	312	36	9,92	17-22	Северное море

Таблица 4 – Паспортные данные турбины Siemens SWT-3,6-120

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	3600
Начальная скорость ветра, м/с	3,5
Номинальная скорость ветра, м/с	12,0
Максимальная скорость ветра, м/с	25,0
Критическая скорость ветра, м/с	70,0
Диаметр ротора, м	120
Скорость вращения ротора, об/мин	до 13
Ометаемая поверхность, м <sup>2</sup>	11300
Тип генератора	Асинхронный
Номинальное напряжение, В	690
Регулирование мощности	Pitch- регулирование

Для оценки выработки электроэнергии при расположении аналогичного ветропарка на перспективных площадках в акватории Балтийского моря у берегов Калининградской области необходимо произвести перерасчет мощности ВЭУ с учетом её зависимости от скорости ветра и коэффициента использования мощности ветрового потока (рис. 7) по (2):

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V^3 \cdot N_g \cdot N_b, \quad (2)$$

где  $P$  – электрическая мощность ВЭУ;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $A$  – площадь ометаемой поверхности, м<sup>2</sup>;  $C_p$  – коэффициент использования мощности ветрового потока;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $N_g$  – КПД генератора;  $N_b$  – КПД коробки передач.

Расчет годовой выработки электроэнергии ВЭУ осуществляется по выражению (3) с учетом коэффициента использования установленной мощности [12]:

$$W_{\Gamma} = K_{\text{И}} \cdot K_{\text{В}} \cdot n \cdot P_{\text{НОМ}} \cdot T_{\Gamma}, \quad (3)$$

где  $W_{\Gamma}$  – годовой объём выработки электроэнергии;  $K_{\text{И}}$  – коэффициент использования установленной мощности (характеризует фактическую мощность ВЭУ с учетом заданной скорости ветра);  $K_{\text{В}}$  – коэффициент, учитывающий взаимное влияние ВЭУ;  $P_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность ВЭУ;  $n$  – количество ВЭУ;  $T_{\Gamma}$  – количество часов в году.

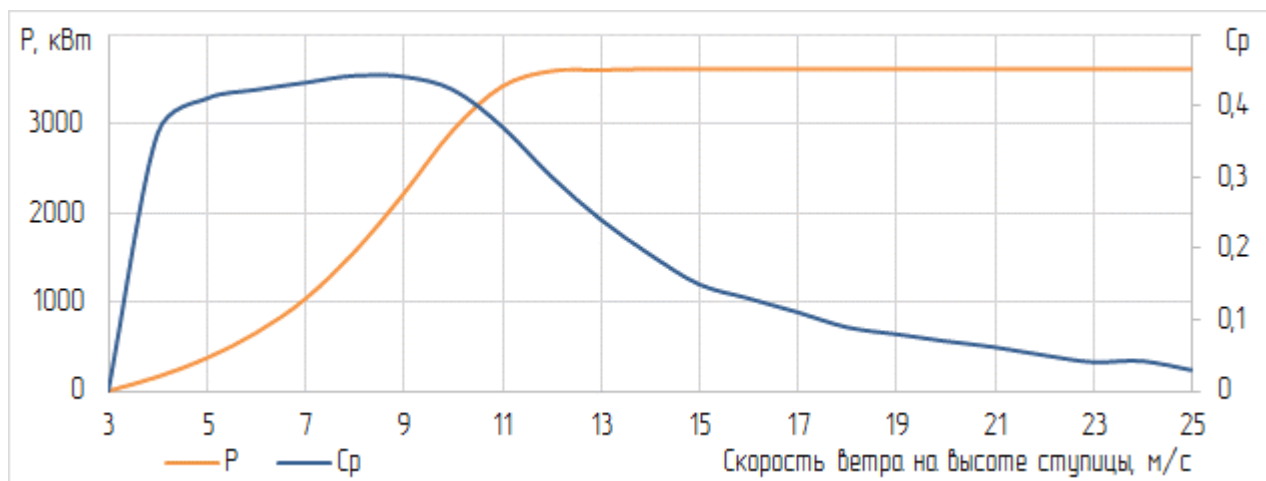


Рисунок 7 – Зависимость мощности и коэффициента использования от скорости ветра для ВЭУ Siemens SWT-3,6-120

По выражению (3) с учетом характеристик турбины Siemens SWT-3,6-120 (рис. 7) при среднегодовой скорости ветра 8,5 м/с годовая выработка электроэнергии одного вертопарка, аналогичного по количеству, типу и расположению установок EnBW Baltic 2, составит 1,204 млрд. кВт·ч, что соответствует 27,1% от общего энергопотребления энергосистемы Калининградской области за 2017 г. (рис. 8) [13].

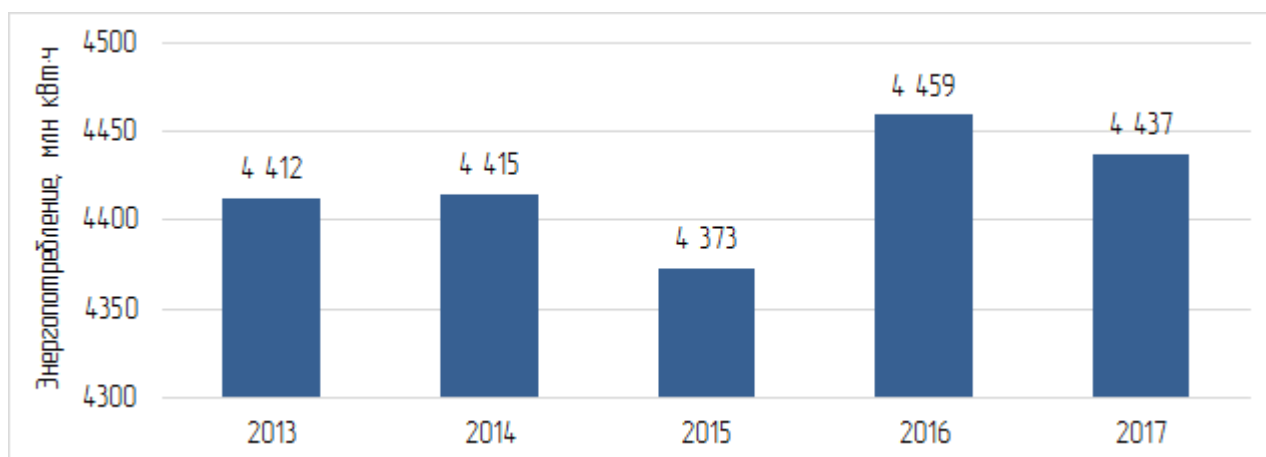


Рисунок 8 – Динамика изменения потребления электроэнергии в Калининградской области

Таким образом, согласно результатам проведенных исследований интенсивное развитие оффшорной ветроэнергетики является общемировой тенденцией. Среди предпосылок помимо перехода к возобновляемым источникам энергии и экологических вызовов следует отметить возможность расположения оффшорных ВЭС вне материковой части, что обеспечивает рациональное использование земель и максимизацию выработки за счет более высоких скоростей ветра. По имеющимся данным, Калининградская область имеет благоприятные условия для развития оффшорной ветроэнергетики, а с учетом её полуэксклавного расположения использование возобновляемых источников энергии позволит повысить энергобезопасность региона при переходе энергосистемы в изолированный режим работы, а также увеличит самообеспеченность энергоресурсами, что соответствует ключевым положениям энергетической стратегии России [14].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. United Nations Environment Programme [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.unenvironment.org>

2. Статья [Электронный ресурс]: Statistical Review of World Energy- all data, 1965-2017. Режим доступа: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
3. Adoption of the Paris Agreement, 12 December 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
4. Экспертный журнал: Концессии и инфраструктурные инвестиции. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://investinfra.ru/novosti/analiticheskiy-centr-pri-pravitelstve-rossii-otmechaet-sokraschenie-vybrosov-uglekislogo-gaza-v-rossii.html>
5. Безруких, П.П. Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / П.П. Безруких, П.П. Безруких (мл.), С.В. Грибков /под общ. ред. П.П. Безруких. — Москва: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2014. — 304 с.
6. Статья [Электронный ресурс]: Global Wind Report, April 2018. Режим доступа: [www.gwec.net](http://www.gwec.net) - Загл. с экрана. – Яз. англ.
7. Статья [Электронный ресурс]: InnoEnergy. Floating Offshore, 2017. Режим доступа: [www.innoenergy.com](http://www.innoenergy.com) - Загл. с экрана. – Яз. англ. Стр 2-5
8. Alpha Ventus [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.alpha-ventus.de/english/>
9. Fraunhofer institute for Wind Energy Systems [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iwes.fraunhofer.de/en.html>
10. Wind farm in the Baltic Sea: EnBW Baltic 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.enbw.com/renewable-energy/wind-energy/our-offshore-wind-farms/baltic-2/>
11. Wind Turbine SWT-3.6-120 Technical specifications [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.siemens.com>
12. Возобновляемые источники энергии: Справочник модуля / В.Ф. Белей [и др.] - Калининград: КГТУ, 2015. – С. 97-100.
13. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Калининградской области на 2019-2023 годы, 28 апреля 2018
14. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утв. Распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 N 1715-р

## ANALYSIS OF WIND POWER DEVELOPMENT TRENDS AND PROSPECTS FOR OFFSHORE WIND POWER IN KALININGRAD REGION

D.K. Kugucheva, student, [kuguchevad@yandex.ru](mailto:kuguchevad@yandex.ru)

M.S. Kharitonov, Dr.Sc.(eng.), associate professor [maksim.haritonov@klgtu.ru](mailto:maksim.haritonov@klgtu.ru)  
Kaliningrad State Technical University

The paper concerns the analysis of the assumptions and global trends in the development of wind power. The authors consider the current state and development trends of offshore wind farms, analyzing a number of sea-based wind farms on the example of German power system. An assessment is made of the prospects for the offshore wind energy in the coastal areas of the Kaliningrad region.

*wind power plant, offshore wind farm, sea-based wind farm, wind potential, renewable energy sources, environmental aspects*