

УДК 620.97

**К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ И ПАРАМЕТРОВ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ**© 2020 г. Э. Е. Сон¹, С. В. Ганага², В. Г. Николаев³, *, Ю. И. Кудряшов³¹*Институт высоких температур Российской академии наук (ИВТАН), Москва, Россия*²*ООО “НИИ Транснефть”, Москва, Россия*³*АНО “Научно-информационный центр “Атмограф”, Москва, Россия***e-mail: atmograph@gmail.com*

Поступила в редакцию 21.02.2020 г.

После доработки 22.05.2020 г.

Принята к публикации 28.05.2020 г.

Проведен обзор и анализ геоклиматической, технической и другой информации о реализованных проектах и об условиях, возможностях и ограничениях работы и эксплуатации ветроэнергетических установок (ВЭУ) и ветродизельных комплексов (ВДК) в ветро-климатических условиях (ВКУ) Аляски и России. Установлены ветро-климатические, технические и эксплуатационные требования к ВЭУ в арктическом исполнении (АркВЭУ) и намечены пути их выполнения. Предложены новые перспективные технические схемы АркВЭУ для автономного энергоснабжения удаленных арктических и северных потребителей. Сформулированы актуальные нерешенные научно-технические проблемы создания и эффективного использования АркВЭУ в России.

Ключевые слова: ветро-климатические условия, автономное энергоснабжение, ветроэнергетические установки, электроэнергия, тепловая энергия, ветродизельные энергокомплексы, накопители энергии, пневматическая энергия (ПЭ), компрессоры, воздушные турбины, трансмиссия, КПД преобразования, графики энергопотребления

DOI: 10.31857/S0002331020030073

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данного исследования обусловлена:

– необходимостью повышения автономности, надежности, экономичности, экологической безопасности и снижения потребления дизельного топлива (ДТ) при энергоснабжении изолированных от централизованных энергосетей потребителей в арктических и северных регионах России;

– отсутствием на российском и мировом рынках ВЭУ, эффективно работающих в ВКУ Арктики и Крайнего Севера, – основного бестопливного источника энергии в богатых ветровыми ресурсами регионах;

– наличием у авторов научного задела в разработках АркВЭУ разных типов.

Основным источником ЭЭ в изолированных от энергосетей северных регионах РФ в настоящее время являются дизельные электростанции (ДЭС). По оценке Российского Энергетического Агентства на арктических, северных и приравненных к северным территориях действуют ~900 ДЭС, вырабатывающих до 2.5 млрд кВт·ч ЭЭ в год, и потребляя свыше 1 млн т ДТ [1, 2].

Проблемами энергоснабжения населенных пунктов и промышленных объектов в Арктических и удаленных северных регионах РФ являются:

- высокая себестоимость ЭЭ ДЭС (до 150 руб./кВт·ч в удаленных пунктах [1, 3]);
- изоляция большей части населенных пунктов, обусловленная их удаленностью, труднодоступностью и дороговизной доставки грузов и топлива;
- удаленность производств традиционных топливных ресурсов;
- дефицит квалифицированного персонала;
- экологические загрязнения, в том числе тарой из-под топлива и различных масел. Выбросы в атмосферу продуктов сгорания топлива на ДЭС составляют до 40 млн т/год углекислого газа, 80 тыс. т окисей серы, 600 тыс. т окислов азота, нанося значительный ущерб окружающей среде и здоровью населения;
- физический износ большей части ДЭС, снижающий надежность и эффективность энергоснабжения и требующий избыточного расхода топлива.

Большую часть проблем энергоснабжения в труднодоступных и удаленных Арктических и северных регионах России могли бы решать бестопливные источники энергии, основными из которых в богатых ветровыми ресурсами регионах российских “Северов” и Арктики являются ВЭУ [2, 3]. Представление о величине и ценности ветровых ресурсов и их распределении на территории России дает приведенная на рис. 1 карта, построенная по авторской методике по данным многолетних измерений параметров атмосферы в приземном слое на государственной сети метеорологических (МС) и аэрологических (АС) станций СССР и РФ [3].

Удельная мощность ветра на высоте 50 м является общепринятым в мире критерием практической ценности ВЭР, согласно которому при среднегодовых значений $W \geq 400$ Вт/м² ВЭР считаются достаточно пригодными для эффективного практического использования, а территории со среднегодовой $W \geq 700$ Вт/м² считаются очень перспективными для использования ВЭС [3].

Из рисунка 1 следует, что условия для эффективного использования ВЭП (при $W > 400$ Вт/м²) выполняются на относительно малой (<10%) площади в основном малонаселенной арктической и дальневосточной территории вдоль северных и восточных морских границ РФ. Но строительству и эффективному использованию ВЭУ в Арктике препятствуют в том числе неблагоприятные для работы и эксплуатации ВЭУ экстремальные ВКУ и сложные для их строительства геологические и гидрологические условия. Определение количественных характеристик и способов преодоления перечисленных препятствий для использования ВЭУ в условиях российской Арктики и Крайнего Севера и явилось целью проведенного исследования.

При этом важнейшей задачей исследования явилось установление технических требований к разрабатываемым российским АркВЭУ в части:

- необходимых температурных диапазонов работы и эксплуатации ВЭУ;
- скоростных диапазонов работы, эксплуатации и сохранности ВЭУ;
- обеспечения работоспособности и сохранности ВЭУ при высоко вероятных гололедо-изморозевых и снеговых отложениях (ГИО);
- обеспечения работоспособности и долговечности ВЭУ при высокой влажности и солености (при их эксплуатации в приморских районах);
- возможностей строительства ВЭС и сложных ремонтных работ в условиях вечной мерзлоты, высокой в ряде регионов сейсмичности, высокого снежного покрова в холодный период года и заболоченности летом.

Большинство результатов решения приведенных выше задач получены авторами в ходе многолетних (2014–2019 гг.) исследований по Программам РАН “Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития арктической зоны Российской Федерации” и “Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития”.

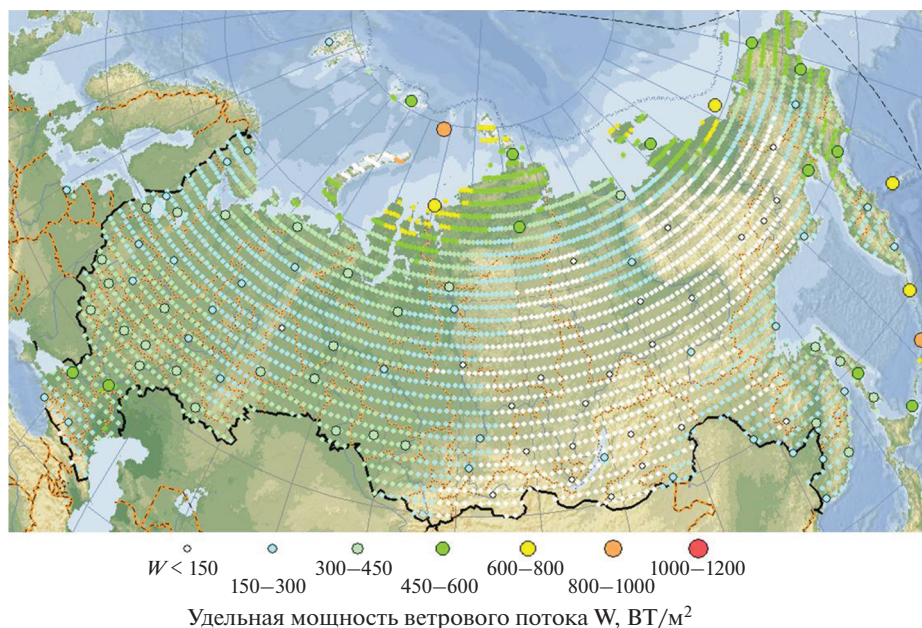


Рис. 1. Карта распределения на территории РФ удельной мощности ветра на высоте 50 м.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЭУ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Первые в мире ВЭС в Арктике были построены в 1930–40-е годы в СССР вдоль Северного Морского пути, часть которых проработала до 10 лет. Базовыми для них были ВЭУ Д-18 мощностью 50 кВт разработки ЦАГИ.

В новое время в России были построены Воркутинская (годы работы 1994–2003) и Анадырская (2002–2017) ВЭС установленной мощности 1.5 и 2.5 МВт соответственно, обе на базе ВЭУ АВЭ-250 отечественной (СССР) разработки и производства на заводе ЮжМаш [3]. При их строительстве и эксплуатации отработано множество инновационных технологических решений, и получен богатый отечественный опыт проектирования, строительства и эксплуатации ВЭУ, специализированных под российские арктические условия.

Неудачи использования первых арктических отечественных ВЭС во многом были связаны с установкой ВЭУ, специально не подготовленных для экстремальных климатических условий, в местах с сильными штормовыми и шквалистыми ветрами (на побережьях) и экстремально низкими для ВЭУ температурами (до -60°C и ниже), при которых велики риски поломок, неэффективной эксплуатации и трудностей ремонтно-восстановительных работ. Неудачен также опыт установки ВЭУ в местах со слабыми ветрами, где большая часть вырабатываемой ими ЭЭ тратится на эксплуатацию ВЭУ.

МИРОВОЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЭУ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Помимо России, к арктическим странам относятся Дания (с Гренландией), Канада, Норвегия, Финляндия, Швеция и США (с Аляской), имеющие значительный опыт и успехи в развитии и использовании ВЭС [6–12]. Так, Дания является мировым лидером по установленной мощности ВЭУ на душу населения. В среднем ВЭС Дании

обеспечивают до 40% потребностей страны в ЭЭ, а в периоды высокой ветровой активности — до 80%. Однако, за редким исключением (гренландские проекты ВДК в Эгедесминне, Айсмитте, Тобине), ее электроснабжение обеспечивается централизованными энергосистемами, основу которых составляют мощные (до 10 МВт) ВЭУ, а опыт использования автономных ВЭС и ВДК носит единичный и экспериментальный характер.

Опыт использования ВЭУ в составе ВДК для автономного энергоснабжения северных территорий имеет Канада, где использование ВЭУ для выработки ЭЭ оправдано экономически и экологически [9]. Согласно опыту проектов ВДК в Клайд и Норман-Уэлсе, основным препятствием в использовании ВЭУ на Севере Канады является неприспособленность большинства предлагаемых мировым рынком ВЭУ к ВКУ севера и сложность их эксплуатации.

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ НА АЛЯСКЕ

В настоящее время лидером использования ВЭУ в Арктике является Аляска (самый северный штат США). Большинство населенных пунктов Аляски изолированы от крупных электросетей и основой их энергоснабжения являются ДЭС. В штате приняты законы, согласно которым, к 2025 г. 50% ЭЭ Аляски должно вырабатываться на ВИЭ, из которых вторым (после ГЭС) по суммарной установленной мощности являются ВЭУ. Использованию ВЭУ в изолированных от централизованного энергоснабжения районах Аляски способствовали рост цен на ДТ, развитие их технологий и наличие в ряде районов Аляски богатых ветровых ресурсов [14]. Ветроэнергетика на Аляске развивается устойчивыми темпами (табл. 1) и находится на втором месте среди возобновляемых источников энергии по суммарной установленной мощности (≈ 70 МВт в 2017 г.) после гидрогенерации (≈ 120 МВт).

На рисунке 2 приведена карта расположения разрабатываемых и реализованных на Аляске энергетических комплексов на базе ВЭУ [15]. В 2011 г. на Аляске было реализовано ≈ 20 проектов (в основном ВДК) суммарной установленной мощности ≈ 9 МВт, и ≈ 10 проектов находилось в разработке. Большинство ВЭУ и ВДК введено в западных (прибрежных) и южных районах Аляски.

Возведение ВЭУ и ВДК на Аляске существенно затруднялось факторами экономической эффективности в условиях холодного климата арктического климата (низкими температуры, пр.) [13–15, 17]. Как следствие этого, многие анонсированные и разработанные в 2010-х гг. проекты ВДК в континентальных и северных областях Аляски (районы Барроу, Фэрбенкс) оказываются не реализованными до сих пор.

Развитием и эксплуатацией традиционных ДЭС, ВДК и ВЭУ на Аляске занимается до двух десятков организаций и компаний. Финансовое обеспечение проектов ВИЭ всех видов, в том числе ВДК, осуществляется из федерального и региональных бюджетов и грантами различных фондов.

К 2017 г. на Аляске было реализовано и работало до 40 автономных энергокомплексов на базе ВЭУ и ВДК [13]. Ряд из них проходят испытания и отладку и еще не представлены данными технического, эксплуатационного и экономического характера. При анализе за основу авторами взяты данные проектов ВЭУ и ВДК Аляски, введенных до 2014 г. и имеющих длительную эксплуатацию (табл. 2). Технические характеристики ВЭУ – ветроэнергетической основы ВДК на Аляске, приведены в табл. 3.

Энергетическая и техническая эффективность ВДК определяется во многом энергетическим, техническим и эксплуатационным совершенством ВЭУ, а также ветровыми ресурсами в местах их использования и ВКУ, ограничивающими функционирование ВЭУ.

Мерами адаптации ВЭУ к арктическому климату Аляски используются системы терморегулирования гондол и размещение силового, электронного оборудования в за-



Рис. 2. Расположение энергокомплексов на базе ВЭУ на Аляске в 2015 г.

крытых утепленных помещениях, а для борьбы с ГИО — системы электроподогрева управляющих анемометров; нанесение ледофобных покрытий на лопасти ВЭУ; покраску лопастей ВЭУ в белый цвет.

В части борьбы с влаго-солевой коррозией используются гальваническая обработка стальных конструкций или покраска стальных конструкций защитной гидрофобной краской.

Особенностями систем и конструкций ВЭУ, установленных на Аляске, является использование:

- систем регулирования мощности ВЭУ как по схеме Pitch, так и Stall-регулирования;
- преимущественно схем Direct Drive в конструкции привода магнитоэлектрических электрогенераторов. Данная особенность во многом объяснима монопольным положением компании – производителя ВЭУ Northern Power Systems (NPS), основанном на многолетнем (с 1989 года по настоящее время) опыте, административном и финансовом ресурсах и, как следствие, наибольшим представительством на территории Аляски серийно выпускаемых ими ВЭУ. Однако в ВДК Аляски также находят применение и ВЭУ с мультипликаторами и синхронными, асинхронными и асинхронизированными генераторами;

Таблица 1. Суммарная установленная мощность ВЭУ на Аляске [13]

Год	Аляска, МВт	США, ГВт
2005	1	9.15
2009	9	35.2
2013	62	61.1
2017	68	89.1

Таблица 2. Энергокомплексы на базе ВЭС с разной долей замещения, размещенные на Аляске (США)

Населенный пункт	Год ввода	Средняя нагрузка, кВт	Установленная мощность, кВт		Количество (, тип ВЭУ, (производитель)	Вспомогательное оборудование	Замещение, мощности, %
			ДЭС, кВт	(Клм) ВЭС			
San Nicolas Island	2009		250	700	(3) Northwind 100 (NPS)	АКБ 1 МВт·ч	9
Yonday Bay	1999		300	300	(3) Northwind 100 (NPS)	АКБ 3.2 МВт·ч	50–80
Gambell	2009			300	(4) Northwind 100 (NPS)		
Chevak	2009			400	(3) Northwind 100 (NPS)		
Hooper Bay	2009			300	(1) Northwind 100 (NPS),		
Delta	2008–2010			1000	(1) EWT 900		
Saint-Paul	2007	120	300	675 (31.9%)	(3) V-27 (Vestas)	Бойлер	55–100
Wales, island	1995	70	411	130 (37.9%)	(2) AOC 15/50 (Entegriy)	АКБ 40 кВт·ч БН 233 кВт	78–100
Kotzebue	1997	2000	11200	1140 (13.3%)	(15) AOC 15/50 (Entegriy), (1) V65 (Vestas), (1) Northwind 100 (NPS)		10
Kasigtuk	2006		1300	300 (23.8%)	(3) Northwind 100 (NPS)		23
Saint Mary	2015	250	2000	380	(4) Northwind 95 (NPS)	АКБ, 31 кВт·ч (Ni-Cd)	37
Scammon Bay	2017		1200	300	(3) Northwind 100 (NPS)		29
Kodiak Island	2014	32000	60000	9000 (33.7%)	(6) GEs 1.5MW (GE) (сеть)		9
Kongiganak Wind-Diesel Smart Grid	2010		2 × 130	475	(5) Windmatic 95 kW	20 Electric Thermal Storage (ETS)	65
Kwigillingok Wind-Diesel Smart Grid	2013		4 × 62	ВЭС – 475	(5) Windmatic 95 kW	АКБ 260 кВт·ч;	66
Tuntutuliak Wind-Diesel Smart Grid	2010	200	4 × 60	ВЭС – 475 (19.8%)	(5) Windmatic 95 kW	АКБ 70 кВт·ч	62
Kokhanok	2011		470	180	(2) V90 kW (Vestas)	АКБ 336 кВт·ч, thermal storage	30–50
Mekoryuk	2009			200	(2) Northwind 100 (NPS)		
Anchorage	2005			16500 (средняя)	(1) GEs 1.5 MW (GE)		
Port Heiden	2004			20	(2) 10 кВт Bergye		
Selawic	2007	330	3 × 220	200 (8.6%)	(4) AOC 15/50 (Entegriy),	160 kW electric boiler	7–15
Nikolsky, Island	2005	50	2 × 70 + 1 × 37	65 (39.8%)	(1) V-1765 kW (Vestas)		10–30
Sand Point	—		1 × 500	4 × 225	(4) V 27 225 kW (Vestas)	ДГУ D-3456	10–20
Tin City	2008		1 × 500	425	(2) Northwind 100 (NPS)		30–60
Nome	2010		270	900	(1) V 27 (Vestas)		
Savonga	2009		200		(18) AOC 15/50 (Entegriy)		
Toksook Bay	2006		3 × 220	400 (26.0%)	(2) Northwind 100 (NPS)		
Perryville	2008	370		24	(4) Northwind 100 (NPS)		
Unalakleet	2009			600	(10) Skystream 3.7 (6) Northwind 100 (NPS)		30–70

Таблица 3. Технические характеристики ВЭУ, используемые в ветроэнергетических проектах на Аляске

Марка ВЭУ	Производитель	Номинальная мощность, кВт	Число лопастей	Диаметр ВК, м	Высота башни, м	Привод генератора	Рабочий диапазон по		Регулирование	
							скорости	температуре	способ	скорость
NW 100	NPS	100	3	21	35.7	Direct Dr	3.5–25	до –35°C	Stall	12
NW 95	NPS	95	3	19	24	Gearbox	4–25	до –35°C	Stall	12.5
AOC 15/50	Integrity	50	3	14.9	30.5	Gearbox	4–25	до –35°C	Pitch	11.3
I7S	Windmatic	95	3	17	18/22/24	Gearbox	3.5–25	до –35°C	Stall	15
1.5sle	GeneralElectric	1500	3	77	80	Gearbox	3.5–25	до –30°C	Pitch	14
V-27	Vestas	225	3	27	32	Gearbox	4–25	до –35°C	Pitch	14
V-15	Vestas	65	3	15	22	Gearbox	4–25	до –30°C	Stall	16
GHRE-30	Ghrepower	30	3	12	20	Direct Dr	3–25	до –30°C	Stall	11

- систем ориентации на ветер ветроколес (ВК) ВЭУ как пассивной с размещением ВК за башней (ВЭУ NW100 первых поколений, EW50), так и активной на базе управляющего анемометра с электроприводом;
- башен и решетчатого, и трубного типа (последних за счет массовой установки ВЭУ моделей NW100 последних поколений);
- монтажа ВЭУ в основном бескранового типа с помощью комплектующих ВЭУ гидроподъемников и систем типа “журавль”.

Экономическая эффективность ВДК зависит от количественных характеристик ВЭП (скорости и удельной мощности ветра) и степени замещения ДЭС за счет ВЭУ. Последняя определяется как доля выработки ВЭУ от всей выработки ВДК (замещение выработки) и как экономия ДТ за счет ВЭУ (замещение топлива). По этим показателям ВДК подразделяются на три типа: с малой, средней и высокой степенью замещения. В ВДК с малым замещением ДГУ постоянно вырабатывает ЭЭ, но часто со сниженной нагрузкой за счет ВЭУ. Вся выработка ВЭУ используется для покрытия нагрузки [17]. Среднегодовое замещение выработки ДГУ – до 20% с экономией ДТ до 15%. ВДК с малым замещением характеризуется относительно низкими капитальными затратами и несложной системой управления. Замещение выработки ДГУ у ВДК со средним замещением составляет от 20 до 50% с экономией топлива от 15 до 50%. У ВДК с высоким замещением доля выработки ВЭУ составляет от 50 до 150% с экономией топлива от 50 до 90%. Для них предусматриваются возможности выключения ДЭС при покрытии нагрузки мощностью ВЭУ. ВДК со средним и высоким замещением оснащаются сложными и дорогими системами управления.

При проектировании ВДК со средним и высоким замещением предусматриваются меры по предотвращению работы ДЭС с мощностью ниже допустимой при большой мощности ВЭУ. К ним относятся сброс части мощности ВЭС в тепловые или электрические аккумуляторы или ее использование для производства водорода, сжатого воздуха, пр.

Нововведением на ВДК, разработанных и реализованных на Аляске в 2011–2015 гг., явились технологии SmartGrid, позволившие увеличить годовую экономию ДТ на 10% и более [14, 17].

Разные уровни замещения требуют различных уровней технической поддержки и капитальных затрат. С точки зрения эксплуатации ВДК с низкой долей замещения, как правило, более надежны, чем ВДК с высокой долей замещения. Хотя ряд источников отмечают и исключения. Так, эксплуатация ВДК с низкой долей замещения в Коцебу, Номе и Селавике сопряжена со трудностями, обусловленными невысоким качеством ВЭУ и, как следствие, увеличенной частотой и длительностью технических и ремонтных простоев.

Согласно опыту Аляски важнейшими условиями эффективного использования ВЭУ в составе ВДК являются техническая надежность и энергетическая эффективность ВЭУ (при наличии высокого ВЭП), обеспечиваемые качественным их проектированием и производством и опытом разработчиков и производителей. Обеспечение устойчивой, надежной и экономичной работы и заявленного ресурса работающего ВДК требует регулярного и квалифицированного регламентного, технического и ремонтного обслуживания. Важнейшим для обеспечения эффективности ВДК является этап ввода в эксплуатацию – обычно двухлетний период “приработки” ВЭУ и, соответственно, ВДК в целом, когда ВЭУ еще не вышла на заявленный производителями эффективный эксплуатационный и рабочий режим.

В ряде источников отмечен риск использования в проектах ВЭУ низкого технического качества, связанного с их недоработкой (обусловленной, как правило, недостаточными испытаниями и их пост испытательной доводкой) или конструкционными ошибками, заложенными при проектировании. Так, работа ВДК в Коцебу, Номе, Уэльсе и Селавике затруднена проблемами эксплуатации ВЭУ EW50 (производства

Entegrity), требующими постоянного обслуживания специализированными организациями [17]. Известны также случаи неэффективного использования ВЭУ в недопустимых для них ВКУ.

Ранние демонстрационные проекты ВЭУ весьма часто сопровождались неудачами. Так, на ВЭУ в Saint Paul дважды заменялись редуктора из-за их поломок при низкой температуре; у ВЭУ в Kotzebue по той же причине многократно выходила из строя тормозная система ветроколеса; фундаменты ВЭУ, устанавливаемой в прерывистой вечной мерзлоте, оказываются многократно сложнее в техническом исполнении и дороже обычных и т.д.

Установка ВЭУ часто требует модернизации других электрических систем. Так энергосистема и инфраструктура поселка Wales была полностью перестроена при добавлении к ней ВЭУ, включая строительство дорог и ЛЭП, с соответствующими существенными затратами.

С развитием технологий и накопление опыта эксплуатации ВДК в сложных ВКУ растет их энергетическая и экономическая эффективность. Так, эффективность и надежность ВДК новых поколений в Kodiak и Toksook Bay значительно выше, чем у первых экспериментальных и демонстрационных проектов. Высокая эффективность достигается использованием избыточной (над нагрузкой) мощности ВЭУ для отопления.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВДК НА АЛЯСКЕ

Проекты ВДК, реализованные в удаленных районах Аляски до 2014 года, сильно различались по установленной мощности ВЭУ (от 24 кВт в Перривилле до 9000 кВт на острове Кадьяк) и удельным капитальным затратам (от 4000 до 15000 USD/кВт при среднем ≈ 9600 USD/кВт), при этом на ВДК в районах с развитой дорожной сетью они составляли ≈ 3100 USD/кВт. Экономическая эффективность ВДК возрастала с ростом масштабов проекта и при использовании избыточной мощности ВЭУ для теплоснабжения.

Принципиально важным для инвесторов и владельцев ВЭУ и ВДК является себестоимость ЭЭ, вырабатываемой ВЭУ, в сравнении с ее получением от ДЭС. Согласно проведенному обзору, диапазон себестоимости ЭЭ, получаемой от ВЭУ в рассмотренных проектах Аляски, составляет от 0.07 USD/(кВт · ч) для крупной системы в проекте ВЭС на острове Kodiak до 0.5 USD/(кВт · ч) в ранних демонстрационных проектах [14], при этом затраты на обслуживание и эксплуатацию ВЭУ в составе ВДК составляют от 0.04 до 0.08 USD/(кВт · ч). Средняя себестоимость ЭЭ ВЭУ, во введенных в 2010-х гг., составляла ≈ 0.14 USD/(кВт · ч), что сопоставимо с себестоимостью ЭЭ ДГУ при стоимости ДТ 0.5 USD/л. Средние цены на ДТ на Аляске в 2010–2015 гг. составляли от 1 до 2 USD/л, а средняя себестоимость ЭЭ всех ДЭС Аляски (без ВЭУ) составляла ≈ 0.23 USD/(кВт · ч) при цене ДТ ≈ 2 USD/л [14].

При этом тарифы на ЭЭ для потребителей на Аляске варьируются от 0.32 до 0.5 USD/кВт · ч и более из расчета 20-летнего ресурса проекта.

Наиболее низкая себестоимость ЭЭ ВДК (≤ 0.10 USD/(кВт · ч)) соответствует энергокомплексам с высоким уровнем замещения (Kodyak и Sant Paul). $K_{\text{иум}}$ ВЭУ обоих проектов превышает 30% благодаря высокой энергетической эффективности ВЭУ и высокому ВЭП в местах их размещения. Эти проекты подтверждают факт снижения стоимости ЭЭ ВДК с высоким уровнем замещения за счет роста экономии ДТ при более высоких капитальных затратах. Так, себестоимость ЭЭ ВДК со средним замещением на базе высокоэффективных ВЭУ марки NW 100 компании NPS даже с высокими на них капитальными затратами, составляет ≈ 0.25 USD/(кВт · ч).

Согласно большинству источников, для возмещения дополнительных затрат на интеграцию ВЭУ в автономные энергокомплексы Аляски уровень замещения суммарной выработки ВДК за счет выработки ВЭУ при имеющихся ценах на ДТ должен со-

ставлять не менее 40%. Уровень же замещения большинства работающих ВДК Аляски пока ниже 25%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ОПЫТА АЛЯСКИ

Выбранная в качестве объекта анализа Аляска является регионом передового в мире развития автономного энергоснабжения на базе ВЭУ и ВДК. Развитию и применению ВЭУ на Аляске способствовали развитие их технологий, рост цен на ДТ, наличие в ряде районов Аляски высокого ВЭП, эффективная политическая и экономическая поддержка проектов ВИЭ федеральной и региональной властью и частным бизнесом.

Развитие на Аляске ВДК на базе ВЭУ идет в направлении роста замещения ими потребляемой мощности (до 80%) и ДТ (до 70%) и полезного использования избыточной мощности ВЭУ в системах теплового аккумулирования, а также в направлении использования элементов технологий SmartGrid для повышения эффективности совместной работы ВЭУ, ДГУ и систем аккумулирования энергии и электрической нагрузки.

Основная часть энергокомплексов на базе ВЭУ и ВДК расположена в районах с высоким ВЭП с холодным климатом типа ХК по классификации ГОСТ 25870-83. В рекордно низкотемпературных для Аляски ВКУ реализован лишь проект ВДК в Коцебу с абсолютным минимумом температуры -54°C .

Согласно доступным в средствах информации данным, в ВДК Аляски используются в основном ВЭУ, изготовленные в стандартном для ХК климатическом исполнении (по техническим спецификациям с температурами выживания не ниже минус 50°C и рабочими температурами не ниже минус 35°C). Поэтому для эффективного использования в разработках российских АркВЭУ опыта Аляски необходим сравнительный анализ ВКУ (температуры, характеристик обледенения и пр.) Аляски и российской Арктики.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРКТИЧЕСКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АЛЯСКИ И РОССИИ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПРОБОВАННЫХ НА АЛЯСКЕ ВЭУ В КАЧЕСТВЕ ПРОТОТИПОВ АРКВЭУ

Проектирование отечественных АркВЭУ необходимо проводить с учетом государственных стандартов – ГОСТ 16350-80 (Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей) и ГОСТ 25870-83 (Макроклиматические районы земного шара с холодным и умеренным климатом. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей). Последний определяет климатические районы с очень холодным (ОХ), холодным с очень влажным летом (ХЛ₁), холодным с холодным (ХЛ₂) и теплым летом (ХЛ₃).

В качестве основных климатических факторов при районировании территории макроклиматических районов с холодным климатом приняты средние из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха, а также сочетания температуры и относительной влажности воздуха. Перечень районов и их критериев приведены в табл. 4.

Данные о средних и абсолютных минимумах температур наиболее холодных районов Аляски и Канады приведены в табл. 5. Согласно ГОСТ 25870-83 абсолютные минимальные температуры в арктической Америке (Аляски и Канады) не опускались ниже -54°C .

При проектировании при выборе температурных диапазонов работы и “выживания” ВЭУ обычно ориентируются на средние многолетние минимумы температур, средние значения которых в пунктах размещения ВЭУ и ВДК на территории Аляски приведены в табл. 6.

Согласно данным табл. 6 при создании ВЭС на территории Аляски минимальные рабочие температуры для базовых ВЭУ выбирались $\geq -30^{\circ}\text{C}$, что допускало использо-

Таблица 4.

Макроклиматический район		Климатический район		Критерий района		
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Средний из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха, °С	Средняя месячная температура воздуха, °С	Средняя месячная относительная влажность воздуха, %
					июль	
Холодный	ХЛ	Очень холодный	ОХЛ	Ниже – 60	–	–
		Холодный с очень влажным летом	ХЛ ₁	От –60 до –45	Ниже 0	Более 90
		Холодный с холодным летом	ХЛ ₂	От –60 до –45	Ниже 5	–
Умеренный	У	Холодный с теплым летом	ХЛ ₃	От –60 до –45	Выше 15	–
		Умеренно холодный	У ₁	От –45 до –40	–	–
		Умеренный	У ₂	От –40 до –25	–	–
		Умеренно теплый	У ₃	Выше –25	–	–

Таблица 5.

Климатический район	Пункт	Абсолютный минимум температуры, °С, по месяцам и за год												
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Очень холодный	Айсмитте-Центральная	–64	–65	–65	–59	–46	–33	–29	–35	–46	–56	–59	–64	–65
Холодный с влажным летом	$j = 84^\circ$ с.ш. $l = 150^\circ$ з.д.	–53	–53	–52	–44	–33	–17	–9	–13	–33	–44	–49	–52	–53
Холодный с холодным летом	Резольют-Бей	–48	–49	–52	–42	–28	–13	–3	–8	–21	–35	–43	–43	–52
Холодный с теплым летом	Норман-Уэлс Фэрбенкс	–53	–50	–46	–36	–18	–3	–1	–2	–13	–32	–43	–50	–53
		–54	–50	–49	–36	–19	–2.2	–1.1	–6.1	–20	–34	–44	–53	–54
Умеренно холодный	Эгедесминне	–32	–34	–34	–30	–20	–6	–4	–2	–8	–13	–24	–32	–34
	Тобин	–44	–42	–44	–35	–23	–8	–5	–4	–12	–25	–33	–40	–44
	Барроу	–47	–48	–44	–38	–26	–16	–3	–6	–17	–36	–39	–46	–48
	Клайд	–46	–44	–43	–39	–31	–17	–4	–6	–16	–26	–34	–44	–46
Умеренный	Анкоридж	–37	–39	–30	–29	–17	–1	2	–1	–7	–21	–29	–36	–39

вание ВЭУ в обычном климатическом исполнении с небольшими доводками (подогревом некоторых элементов ВЭУ).

Использование такого подхода при разработке российского АркВЭУ связано, по мнению авторов, с большими рисками снижения его надежности в силу существенно более низких температур, имеющих место в арктической зоне России с преимущественным климатом типа ОХ по ГОСТ 25870-83.

В подтверждение этого в табл. 7 приведено сравнение температурных условий ряда репрезентативных пунктов арктических зон Аляски и России.

Таблица 6. Средние многолетние минимумы температур в пунктах размещения ВЭУ и ВДК на территории Аляски

Населенный пункт	Страна, регион	Наиболее низкие температуры
San Nicolas Island	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -12^{\circ}\text{C}$
Yonday Bay	США, Аляска	$T_{\text{МИН}} \geq -28^{\circ}\text{C}$
Saint-Paul	США, Аляска	$T_{\text{МИН}} \geq -28^{\circ}\text{C}$
Wales, Island	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -13^{\circ}\text{C}$
Kotzebue	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -26^{\circ}\text{C}$
Kasigluk	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -18^{\circ}\text{C}$
Saint Mary	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -18^{\circ}\text{C}$
Scammon Bay	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -21^{\circ}\text{C}$
Kodiak Island Wind Project	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -5^{\circ}\text{C}$
Kongiganak Wind-Diesel Smart Grid	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -20^{\circ}\text{C}$
Kwigillingok Wind-Diesel Smart Grid	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -20^{\circ}\text{C}$
Tuntutuliak Wind-Diesel Smart Grid	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -18^{\circ}\text{C}$
Kokhanok Wind Generator	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -13^{\circ}\text{C}$
Anchorage	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -12^{\circ}\text{C}$
Selawic	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -27^{\circ}\text{C}$
Nikolsky, Island	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -17^{\circ}\text{C}$
Sand Point	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -6^{\circ}\text{C}$
Tin City	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -13^{\circ}\text{C}$
Toksook Bay (Nelson Island)	США, Аляска	$T_{\text{МИН СР}} \geq -17^{\circ}\text{C}$

ВЕТРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, ОГРАНИЧЕНИЯ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЭУ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

Температурные факторы

Условия функционирования ВЭУ определяются диапазоном рабочих температур T_p ($T_{p\text{ МИН}} < T_p < T_{p\text{ МАКС}}$), заданных в их технических паспортах, и значениями допустимых предельно низких ($T_{\text{МИН}}$) и высоких ($T_{\text{МАКС}}$) температур, при превышении которых использование ВЭУ запрещается. Максимально высокие и низкие рабочие температуры современных ВЭУ составляют соответственно $T_{p\text{ МАКС}} \approx +40...+45^{\circ}\text{C}$ и $T_{p\text{ МИН}} \approx -20...-35^{\circ}\text{C}$.

Особенно опасны низкие температуры (<минус $40-50^{\circ}\text{C}$) по причинам:

- падения выработки ЭЭ и ресурса ВЭУ из-за возможных поломок и нестабильной работы и ухудшения характеристик электронных компонент вследствие изменений физических (структурных и прочностных) свойств используемых в конструкции ВЭУ материалов (сталей, пластмасс, резины, смазочных материалов), приводящих к уменьшению ресурса;

- простоев при температурах ниже допустимых рабочих (со снижением выработки до $10-15\%$ и, соответственно, эффективности ВЭУ и ВЭС);

- затратами на обогрев (до $5-10\%$ годовой выработки ЭЭ ВЭУ) неморозостойких частей ВЭУ (редукторов, генераторов, аккумуляторов, силового оборудования, смазочных материалов), располагаемых в гондоле;

- ограничений по строительству, монтажу, ремонту и эксплуатации.

Вероятность пребывания температуры ниже -40°C существенна, а ниже -30°C высока в зимний период в арктических и во многих регионах РФ, что приводит к простоям ВЭУ и ВЭС по температурным ограничениям.

Таблица 7. Средние ($T_{\text{МИН СР}}$) и абсолютные ($T_{\text{МИН АБС}}$) минимумы температур, °С

Район	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
Аляска												
<i>Анкоридж</i>												
$T_{\text{МИН СР}}, ^\circ\text{C}$	-11.6	-10.1	-7.1	-1.6	4.2	8.7	11.2	10.0	5.6	-1.6	-8.6	-10.4
$T_{\text{МИН АБС}}, ^\circ\text{C}$	-37.2	-38.9	-31.1	-29.4	-17.2	-1.7	1.1	-0.6	-10.6	-21.1	-29.4	-37.8
<i>Коцебу</i>												
$T_{\text{МИН СР}}, ^\circ\text{C}$	-22.6	-23.3	-22.1	-15.9	-3.7	3.8	9.7	8.6	2.9	-7.3	-16	-21.3
$T_{\text{МИН АБС}}, ^\circ\text{C}$	-48	-47	-50	-42	-24	-7	-1	-3	-11	-28	-38	-45
<i>Тонтутулак</i>												
$T_{\text{МИН СР}}, ^\circ\text{C}$	-19	-19	-18	-11	-1	4	7	7	3	-5	-12	-18
$T_{\text{МИН АБС}}, ^\circ\text{C}$	-39	-38	-36	-34	-17	-5	-1	-2	-7	-22	-31	-36
<i>Фэрбенкс</i>												
$T_{\text{МИН СР}}, ^\circ\text{C}$	-28.3	-26.4	-19.3	-6.8	2.7	9.2	11.1	7.9	1.5	-9.1	-21.4	-26.2
$T_{\text{МИН АБС}}, ^\circ\text{C}$	-54.4	-50.0	-48.9	-35.6	-18.3	-2.2	-1.1	-6.1	-19.1	-33.3	-43.8	-52.2
Россия												
<i>Тикси</i>												
$T_{\text{МИН СР}}, ^\circ\text{C}$	-33.8	-33.3	-30.8	-23.7	-9.7	0.1	3.9	4.5	-1.2	-14.3	-27.1	-31.9
$T_{\text{МИН АБС}}, ^\circ\text{C}$	-48.0	-50.5	-47.2	-46.9	-32.2	-15.8	-3.9	-4.0	-18.2	-35.0	-43.9	-48.8
<i>Якутск</i>												
$T_{\text{МИН СР}}, ^\circ\text{C}$	-41.5	-38.2	-27.4	-11.8	1.0	9.3	12.7	8.9	1.2	-12.2	-31.0	-40.4
$T_{\text{МИН АБС}}, ^\circ\text{C}$	-61.2	-54.7	-27.5	-13.0	1.5	12.4	15.8	10.3	2.4	-13.9	-34.8	-54.7
<i>Дудинка</i>												
$T_{\text{МИН СР}}, ^\circ\text{C}$	-44	-35	-28	-20	-6	3	8	5	-3	-11	-29	-40
$T_{\text{МИН АБС}}, ^\circ\text{C}$	-61	-54	-46	-43	-26	-6	-1	-3	-18	-39	-51	-58
<i>Норильск</i>												
$T_{\text{МИН СР}}, ^\circ\text{C}$	-30.7	-31.0	-26.4	-18.5	-8.4	3.2	10.0	7.6	1.2	-12.5	-23.9	-28.0
$T_{\text{МИН АБС}}, ^\circ\text{C}$	-64.7	-52.0	-46.1	-38.7	-26.8	-9.8	0.4	-1.0	-14.0	-36.0	-43.3	-51.0
<i>Чокурдах</i>												
$T_{\text{МИН СР}}, ^\circ\text{C}$	-37.1	-35.9	-31.2	-22.9	-8.9	2.1	6.4	4.1	-1.0	-14.4	-27.9	-35.0
$T_{\text{МИН АБС}}, ^\circ\text{C}$	-54.4	-50.3	-48.2	-42.6	-30.0	-11.2	-1.3	-4.8	-18.2	-35.1	-46.9	-49.8

При температурах выше $T_{\text{р МАКС}}$ (но не выше $T_{+\text{МАКС}}$) и ниже $T_{\text{р МИН}}$ (но не ниже $T_{-\text{МИН}}$) ВЭУ по команде системы управления останавливается и в остановленном состоянии пребывает до возвращения температуры окружающего воздуха в рабочий диапазон с неким запасом ($T_{\text{р МАКС}} - \Delta T_{\text{р МАКС}}$) и ($T_{\text{р МИН}} + \Delta T_{\text{р МИН}}$). Значения $T_{\text{р МАКС}}$ и $T_{\text{р МИН}}$ задаются при проектировании исходя из термической стойкости отдельных компонент и ВЭУ в целом к температурным факторам. Вероятность и время пребывания ВЭУ в режиме ожидания температурного режима, соответствующего рабочему диапазону температур, следует учитывать при определении выработки ВЭУ.

Пример расчета и рекомендуемый формат представления данных статистического анализа распределения по длительности периодов с экстремальными для ВЭУ температурами для МС Тикси дан в таблицах 8–10.

В табл. 8 представлены результаты расчетов количества периодов разной заданной длительности (1–3, 4–6, 7–9, 10–12, 13–15 суток) со средними многолетними (за пе-

Таблица 8. Число периодов разной длительности с многолетними среднесуточными и минимальными суточными температурами $< T^*$

Тикси 128.9 в.д. 71.7 с.ш.										
Средние многолетние за расчетный период: 1975–2017 гг.										
Диапазон минимальных температур T^*	Число периодов длительности от N1 до N2 суток со средними суточными температурами $< T^*$					Число периодов длительности от N1 до N2 суток с минимальными суточными температурами $< T^*$				
	1–3	4–6	7–9	10–12	13–15	1–3	4–6	7–9	10–12	13–15
$T^* = -40^\circ\text{C}$	2.2	0.2	0.1	0	0	4.2	1.2	0.4	0.1	0
$T^* = -45^\circ\text{C}$	0.2	0	0	0	0	0.8	0.1	0	0	0
$T^* = -50^\circ\text{C}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$T^* = -55^\circ\text{C}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

риод 1975–2015 годы) среднесуточными и минимальными суточными температурами ниже заданных отрицательных температур (-40°C , -45°C , -50°C и -55°C). В среднемноголетнем представлении за год в Тикси наблюдалось 2.2 и 0.2 (1 раз в 5 лет) и 0.1 (1 раз в 10 лет) периода длительностью соответственно 1–3, 4–6 и 7–9 сут и 4.2; 1.2; 0.4 и 0.1 периода длительностью соответственно 1–3, 4–6, 7–9 и 10–12 сут соответственно со среднесуточными температурами и с минимальными суточными температурами ниже -40°C .

Периоды со среднесуточными температурами и с минимальными суточными температурами $< -45^\circ\text{C}$ длительностью от одного до трех суток в Тикси наблюдались в среднемноголетнем соответственно 0.2 и 0.8 раз за год, а периоды 4–6 сут наблюдались только для минимальных суточных температур со средней частотой 0.1 раз за год, или 1 раз в десять лет. Периодов со среднесуточными и минимальными суточными температурами ниже -50°C длительностью в одни сутки и более на МС Тикси за период 1975–2015 гг. не наблюдалось.

В таблице 9 даны результаты расчетов количества периодов разной описанной выше длительности со среднемноголетними среднесуточными и минимальными суточными температурами ниже заданных отрицательных температур в наиболее холодный год (2013) за период 1975–2017 гг.

Согласно расчетам наличие периодов до 4–6 сут для среднесуточных и до 10–12 сут минимальных суточных температур $<$ минус 45°C .

Из данных табл. 9 и 10 и рис. 3 и 4 следует, что “идеальная” ВЭУ, максимально полно использующая ВЭП в районе Тикси, должна обеспечивать выработку ЭЭ при температурах до минус 45°C , а в случае использования ВЭУ как единственного энергоисточника она должна быть укомплектована аккумуляторами энергии емкостью, обеспечивающей энергоснабжение на случай вероятного штитового простоя ВЭУ до 10–12 сут.

Для современных “неидеальных” ВЭУ полученная оценка должна быть уточнена с учетом систем управления, останавливающих ВЭУ при минимально допустимой рабочей температуры и запускающих их в работу по достижению указанного выше повышения температуры окружающего воздуха до $(T_{\text{MIN}}^p + \Delta T_{\text{MIN}}^p)$, где ΔT_{MIN}^p варьируется для реальных ВЭУ от 5 до 10°C .

С учетом данной реальности результаты, полученные в табл. 8 и 9, следует уточнять по аналогии с примером, представленным в табл. 10.

Помимо экстремальных температур, определяющих “живучесть” ВЭУ, характеристиками, определяющими энергетические показатели ВЭУ и ВЭС и требующими определения при их проектировании, являются:

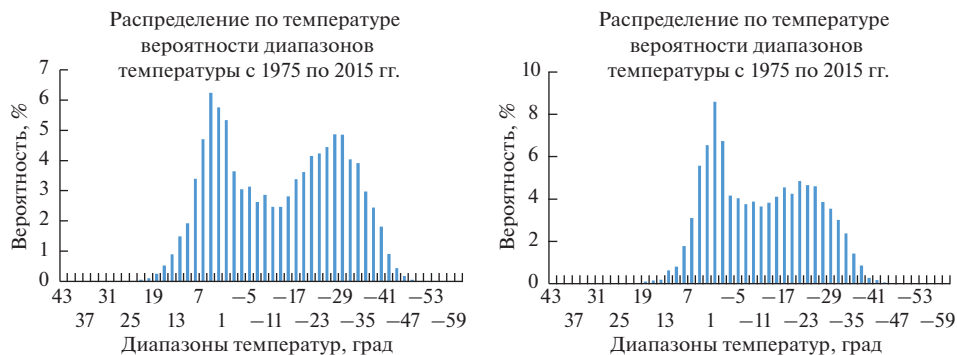


Рис. 4. Графики функций плотности вероятности распределения температуры. (Вероятности на графиках исчислены делением числа измерений в каждой градации за весь период наблюдений к общему числу измерений за весь период.)

– средние годовые, сезонные и месячные вероятности пребывания температуры в ПзСА за пределами рабочих температурных диапазонов ВЭУ, определяющих простой ВЭУ по температурным ограничениям;

– максимальные и средние длительности периодов пребывания температуры атмосферы за пределами и в пределах рабочих температурных диапазонов ВЭУ, предназначенных для автономного энергоснабжения, определяющих технические и экономические характеристики их аккумулирующих систем;

– максимальные и средние продолжительности периодов неблагоприятных для ВЭУ сочетаний температур, влажности и ветра, способствующих обледенению и снеговому отложению на элементах конструкции ВЭУ и требующих специальных антиобледенительных мер или остановки ВЭУ;

– максимальные и средние продолжительности периодов неблагоприятных сочетаний низких температур (ниже рабочего температурного режима ВЭУ) и больших скоростей ветра (превышающих “буревые” скорости ВЭУ).

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АРКВЭУ

Рабочие режимы и энергетическая эффективность ВЭУ определяет следующий набор значений скорости ветра:

– стартовая скорость ветра V_C , при которой ненагруженное ветроколесо (ВК) ВЭУ начинает вращаться (у современных ВЭУ $V_C \sim 3.0\text{--}4.0$ м/с);

– начальная рабочая скорость ветра V_0 , при которой ВЭУ начинает выдавать электроэнергию ($V_0 \sim 3.5\text{--}5.0$ м/с);

– V_P – скорость регулирования – скорость ветра, при достижении и превышении которой ВЭУ выдает номинальную мощность (рис. 7) ($V_{REG} \sim 8.0\text{--}15.0$ м/с);

– $V_{БУР Н}$ – буревая скорость – нарастающая скорость ветра, при которой ВК ВЭУ останавливают по прочностным соображениям ($V_{БУР Н} \sim 20\text{--}28$ м/с);

– $V_{Э}$ – экстремальная скорость ветра и порывов ветра ($V_{Э} \sim 50\text{--}70$ м/с);

– $V_{БУР У}$ – буревая скорость – убывающая скорость ветра, ниже которой ВК ВЭУ включается в работу (обычно $V_{БУР У}$ меньше $V_{БУР Н}$ на 15–20%);

– во всем диапазоне скоростей рабочих ветров (V_P) для ВЭУ ($V_0 < V_P < V_{БУР Н}$) мощность ВЭУ определяется ее рабочей (мощностной) характеристикой $P(V)$ или зависимостью мощности ВЭУ от скоростей набегающего на ВК ВЭУ ветра.

Указанные скоростные характеристики ветра определяются согласно международному стандарту IEC 61400 на высоте оси ВК ВЭУ, в связи с чем принципиальное значение имеет достоверное моделирование высотных профилей скорости ветра $V(h)$ в приземном слое атмосферы (ПзСА) в местах установки ВЭУ, проводимого с использованием накопленных в России данных многолетних измерений в ПСА на государственной сети метеорологических (МС) [18] и аэрологических (АС) [19] станций и данных многоуровневых измерений на устанавливаемых на мачтах ветроизмерительных комплексах (ВИК) [20, 21]. Результаты в данной статье получены с использованием разработанной авторами трехслойной полуэмпирической модели $V(h)$, основанной на аэродинамических и физических представлениях о вертикальной структуре ПзСА. Используемая модель является наиболее достоверной из известных и обеспечивает наибольшее соответствие (с погрешностью < 15–17%) с данными измерений на МС, АС и ВИК [20] в любом заданном пункте Российской Арктики.

Примеры $P(V)$ ВЭУ марки V 27 датской компании Vestas и аппроксимации повторяемости скоростей ветра по градациям (функции плотности вероятности скоростей ветра $f(V)$), полученные по данным измерений ветра на метеостанциях Бухта Тикси (Республика Саха-Якутия) и остров Диксон (Таймыр) даны на рис. 3.

Обобщающие результаты расчетов вероятностных характеристик ветра в зависимости от разных установленных рабочих скоростей ВЭУ, проведенных авторами по данным измерений ветра [18, 19] для энергетически дефицитного в Арктике холодного периода года (ноябрь–март), на репрезентативных российских арктических метеостанциях даны в табл. 11 и 12.

Стартовая скорость ВЭУ V_0 определяет вероятности простоев ВЭУ из-за ветровых штилей при $V_0 < 4$ или 5 м/с (столбцы 2 и 3). В столбцах 4–6 приведены данные о потере (в %) мощности ветра при разных скоростях регулирования $V_{\text{РЕГ}}$ (12, 14 и 16 м/с). В столбцах 7–10 приведены данные о вероятности (в %) полезной работы ВЭУ в режиме выдачи мощности и энергии.

Согласно проведенным расчетам, оптимальным является выбор для АркВЭУ значений скоростей, приведенных в табл. 13.

АркВЭУ с такими значениями рабочих скоростей позволят повысить их мощность и выработку ЭЭ на 50–60% по сравнению с существующими серийными ВЭУ в обычном климатическом исполнении. ВЭУ и их компоненты, работающие с такими значениями рабочих скоростей в арктических условиях должны обладать повышенными прочностными и динамическими качествами.

Ограничения условий функционирования ВЭУ и ВЭС по комплексу параметров “температура – скорость ветра”

Для иллюстрации на рис. 4–8 приведены результаты расчетов и сравнительного методического анализа климатических комплексов “температура – скорость ветра”, полученных по данным измерений этих параметров на двух российских арктических станциях: Бухта Тикси и остров Диксон, относящихся к климатическому району арктического берегового типа. Полученные в результате рекомендуемого в стандарте анализа данные важны при выборе технических характеристик серийных или проектируемых ВЭУ, планируемых к использованию в районах арктического климата.

Согласно расчетам функции плотности вероятности распределения температуры в приведенных пунктах обнаруживают схожий и явно выраженный бимодальный характер при более высоком и узком летнем максимуме (рис. 4). Согласно проведенному анализу за рассмотренный период метеоизмерений (1975–2017 гг.) в обоих пунктах не регистрировались отрицательные температуры ниже -50°C .

Средние многолетние среднесуточные скорости ветра на высотах метеоизмерений (≈ 10 м) в приведенных пунктах согласно расчетам (рис. 5) достигают максимальных

Таблица 11. Зависимость вероятностных характеристик ветра от установленных рабочих скоростей ВЭУ

Метеостанция	Вероятность простоя ВЭУ, % при стартовой		Потери (%) при скорости регулирования ВЭУ			Вероятность выдачи мощности и энергии ВЭУ, %			
	скорости ВЭУ V_0		$V_{РЕГ}$, м/с			V_0	$V_{РЕГ}$, м/с		
	4 м/с	5 м/с	12.0	14.0	16.0		12.0	14.0	16.0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тазовское	23.85	30.27	21.22	11.47	6.81	4 м/с	54.9	64.7	69.3
						5 м/с	48.5	58.3	62.9
Марре-Сале	18.69	27.93	18.68	11.20	6.69	4.0	62.6	70.1	74.6
						5.0	53.4	60.9	65.4
Амдерма	16.97	23.46	32.33	22.04	14.31	4.0	50.7	61.0	68.7
						5.0	44.2	54.5	62.2
Остров Диксон	26.39	33.06	26.00	18.68	12.66	4.0	47.6	54.9	60.9
						5.0	40.9	48.3	54.3
Бухта Тикси	49.25	54.91	17.10	11.82	8.41	4.0	33.7	38.9	42.3
						5.0	28.0	33.3	36.7
Дальне-Зеленецкая	8.70	14.55	38.10	27.28	20.55	4.0	53.2	64.0	70.8
						5.0	47.3	58.2	64.9
Салехард	53.65	63.80	16.08	13.77	12.53	4.0	30.3	32.6	33.8
						5.0	20.1	22,4	23,7

Таблица 12. Вероятностные характеристики ветра в зависимости от установленных буревых скоростей ВЭУ ($V_{БУР Н} = 25$ и 29 м/с и $V_{БУР У} = 20$ и 25 м/с)

Метеорологическая станция	Высота измерения $h_{метео}$, м	Высота оси ВК ВЭУ $H_{ВК}$, м	Скорость ветра, м/с		f , % для $V >$		+ Δ , %
			на $h_{метео}$	на $H_{ВК}$	25 м/с	29 м/с	
1	2	3	4	5	6	7	8
Амдерма	12.0	25.0	7.90	8.56	1.89	1.11	0.78
(Ненецкий АО)		50.0		9.23	3.71	1.11	2.43
Диксон, остров	10.0	25.0	7.50	8.35	3.06	1.70	1.36
(п-в Таймыр)		50.0		9.06	4.97	1.70	3.26
Ванкарем	8.0	25.0	6.50	7.64	1.44	0.55	0.89
(Чукотский АО)		50.0		8.44	2.37	0.55	1.81
Тикси	10.0	25.0	5.00	5.96	1.83	0.83	0.99
(Респ. Саха-Якутия)		50.0		6.82	3.23	0.83	2.38
Дальне-Зеленецкая	11.0	25.0	8.10	8.83	3.65	2.12	1.53
(Мурманская обл.)		50.0		9.50	6.34	2.12	4.08

Таблица 13. Оптимальные значения рабочих скоростей АркВЭУ

Рабочие скорости:	V_C	V_0	$V_{РЕГ}$	$V_{БУР Н}$	$V_{БУР У}$
Оптимальные значения рабочих скоростей, м/с :	3.0–3.5	4.0–4.5	15.0–16.0	28–29	24–25

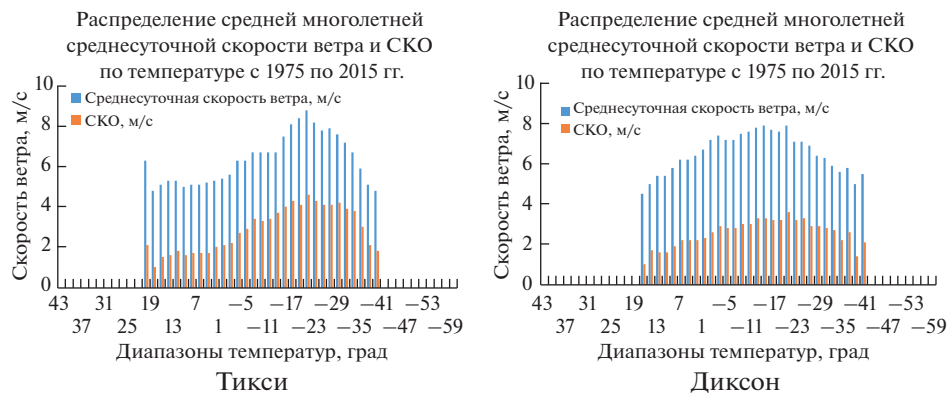


Рис. 5. Распределения средних многолетних среднесуточных скоростей ветра.

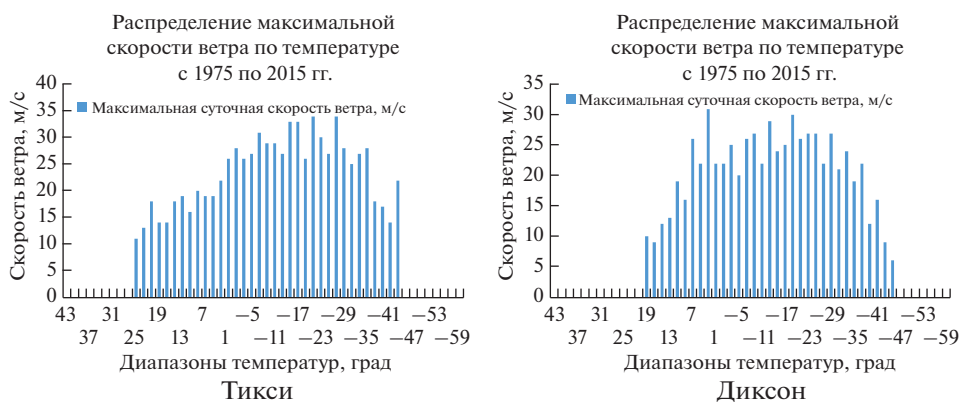


Рис. 6. Распределения максимальных скоростей ветра.

значений в умеренно холодный период года (на МС Тикси $\approx 7.5\text{--}8$ м/с при температурах от -15°C до -30°C и $\approx 7.2\text{--}7.7$ м/с на МС Диксон при температурах от -5°C до -20°C) и уменьшаются примерно в 1.5 раза при снижении температур до $\approx -40^\circ\text{C}$ в обоих пунктах.

Среднеквадратические отклонения (СКО) скоростей ветра составляют от 40–45% от средних суточных скоростей ветра в теплый и экстремально холодный ($T < 35^\circ\text{C}$) периоды и 50–60% в холодный период года.

Согласно анализу данных многолетних метеоизмерений (рис. 5 и 6) в этих пунктах за период 1975–2015 гг., как и в большинстве рассмотренных авторами МС на территории Российской Арктики, при экстремально низких температурах ($< -45\text{...}-50^\circ\text{C}$) имеют место ветроэнергетические штили, при которых ВЭУ будут простаивать. То есть, достаточным нижним порогом рабочих температур для российских АркВЭУ является $-45\text{...}-50^\circ\text{C}$.

Согласно расчетам по данным метеоизмерений (рис. 6) скорости ветра, превышающие предельно допустимые для большинства ВЭУ рабочие скорости 25 м/с, реализуются при температурах от 0°C до -35°C в Тикси со среднегодовой вероятностью $\approx 11.3\%$ (простой ВЭУ по буревой скорости) и от 5°C до -30°C на Диксоне со среднегодовой вероятностью $\approx 2.1\%$.



Рис. 7. Распределения вероятности ветроэнергетических штилей.

Значения вероятностей ветроэнергетических штилей (при скоростях ветра на высотах метеоизмерений $< 3\text{--}4$ м/с) принципиально важны при выборе энергоисточников, резервирующих и выравнивающих непостоянную мощность ВЭС и аккумулирующих систем для автономных ВЭС.

Распределение вероятностей штилей на МС Тикси и Диксон, данное на рис. 7, дает представление об их средних значениях.

Характер вероятностей штилей в Тикси и на Диксоне количественно различаются. На Диксоне (рис. 7) вероятности штилей минимальны (не выше 10%) при температурах от $+7^\circ\text{C}$ до -15°C и монотонно растут с понижением температур до -40°C , не превышая в максимуме 30%.

В Тикси при всех температурах, или на протяжении всего года, вероятности штилей не опускаются ниже 20%, а в диапазоне температур от -5°C до -45°C монотонно растут до значений $\approx 40\%$ при температурах от -25°C до -30°C и далее до 80% и выше при температурах $-35^\circ\text{C}\dots-45^\circ\text{C}$.

Значения скоростей ветра на высотах метеоизмерений, превышающих 25 м/с, принципиально важны при определении времени и частоты простоев ВЭУ и ВЭС по буревым условиям. Средние многолетние вероятности регистрации таких скоростей на МС Тикси и Диксон, исчисленные в % от годового периода (8760 ч), даны на рис. 8 и иллюстрируют в Тикси и на Диксоне заметные количественные различия. На Диксоне (рис. 8) эти вероятности не превышают 0,4% даже в максимумах, обнаруживаемых при температурах (T) порядка $-10\dots-15^\circ\text{C}$ и $-25\dots-30^\circ\text{C}$, и $\leq 0,15\text{--}0,2\%$ при температурах до -30°C , а при температурах $< -30^\circ\text{C}$ скорости > 25 м/с за исследованный период не наблюдались. В Тикси при T от -10 до -26°C вероятность скоростей > 25 м/с достигает 1,5%, при температурах $< -35^\circ\text{C}$ — не превышает 0,25%, а при температурах $< -35^\circ\text{C}$ равен нулю.

Данные для выбора параметров АркВЭУ и энергоисточников (ДЭС), резервирующих и выравнивающих переменную мощность ВЭС, а также аккумулирующих систем для автономных ВЭС, выбираются статистическим анализом данных распределения по длительности периодов с экстремальными для ВЭУ и ВЭС температурами и скоростями. Пример расчета плотности вероятности распределения длительности штилей по данным МС Тикси дан на рис. 9.

Вероятность простоев ВЭУ по температурным ограничениям приводит к трансформации функции плотности вероятности распределения ветра по скоростям $f(U)$, используемой при расчетах мощности ВЭУ, проиллюстрированной на примере на МС

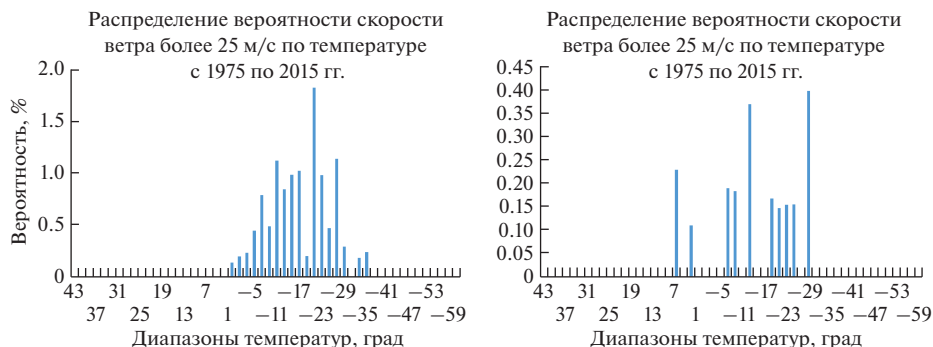


Рис. 8. Распределения буревых скоростей ветра.

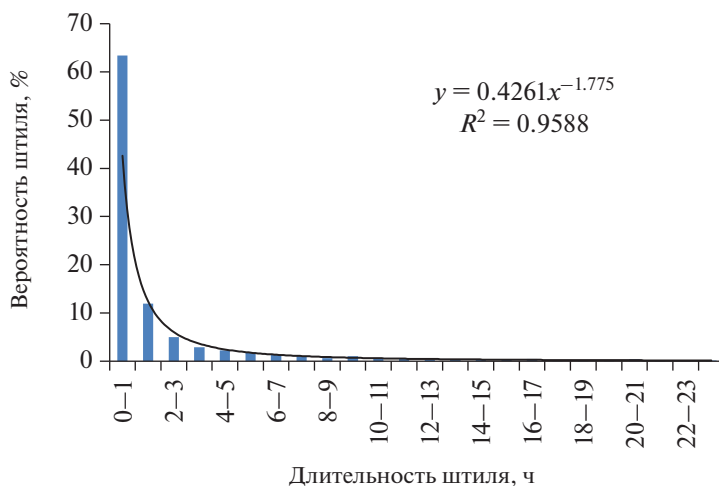


Рис. 9. Плотность вероятности распределения длительности штилей в районе бухты Тикси.

остров Диксон в зимний период, приводящую к уменьшению мощности и выработки ВЭУ на 6% (рис. 10).

Пример расчета сочетаний температуры и скорости ветра дан в табл. 14, содержащей двумерные функции распределения температуры воздуха и скорости ветра, рассчитанной по данным МС Тикси. По данным табл. 9 вероятность простоев представленных на мировом рынке ВЭУ с рабочими скоростями 4–25 м/с при допустимых для них низких температурах (<−35°C) составит в районе Тикси ≥16.6%, или ≈30% от ≈50%-ной вероятности годового пребывания скоростей ветра в диапазоне рабочих скоростей ВЭУ.

Затенением в табл. 14 выделены ячейки с вероятностью сочетаний скорости ветра и температуры, при котором по требованиям техники безопасности (табл. 15) запрещены строительно-монтажные операции с ВЭУ и работы с ними с использованием крановой техники.

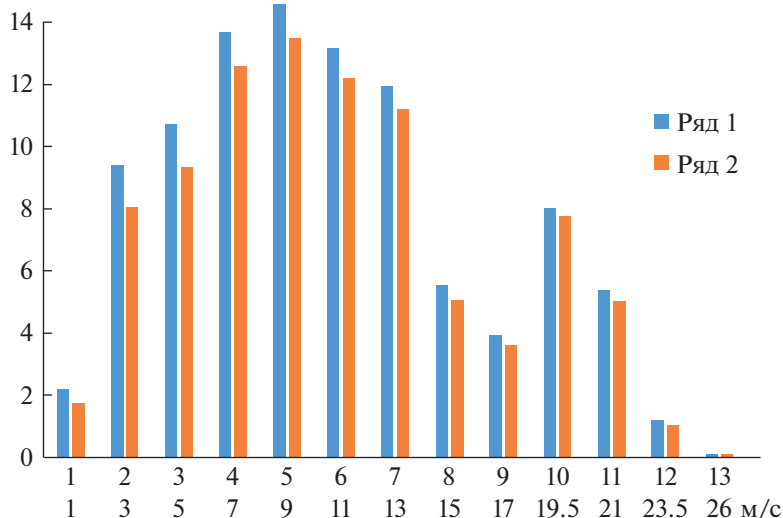


Рис. 10. Повторяемости скорости ветра на МС Диксон в зимний период: Ряд 1 и Ряд 2 – без и с учетом температурных ограничений соответственно.

Данные табл. 14 и 15 необходимы для оценки вероятности простоев ВЭУ при экстремальных для них температурах (от $<-35^{\circ}\text{C}$ до -20°C в зависимости от климатического исполнения ВЭУ) и при скоростях ветра, попадающих в диапазон рабочих скоростей ВЭУ (от 3–5 м/с до 20–28 м/с для разных моделей ВЭУ), и для оценки вероятности периодов с невозможностью использования крановой техники и монтажных операций для производства профилактических и ремонтно-восстановительных работ с ВЭУ.

ОГРАНИЧЕНИЯ РАБОТЫ ВЭУ ПО ГОЛОЛЕДНО-СНЕГОВОЙ ОПАСНОСТИ

Еще одним ограничением использования ВЭУ в условиях арктического климата является высокая вероятность гололедно-изморозевых и снеговых отложений (ГИО) на элементах конструкции ВЭУ.

ГИО относятся к неблагоприятным климатическим явлениям и по своей интенсивности, масштабу распространения и длительности действия могут существенно снижать показатели работы ВЭУ. Негативными последствиями ГИО для работы ВЭУ и ВЭС и их эксплуатации являются следующие:

- приведение в нерабочее состояние системы управления ВЭУ за счет обледенения датчиков скорости и направления ветра и, как следствие, останову и дополнительным внеплановым простоям ВЭУ;

- снижение аэродинамического качества лопастей ВЭУ, приводящее к задержкам при запуске ВЭУ и существенному снижению их мощностей;

- неравномерности вращения ветроколес ВЭУ, обусловленные повышенными динамическими нагрузками на лопасти ВЭУ и увеличивающими риски их поломок и разрушения;

- увеличение статической и динамической нагрузки на башню, фундамент и крепежные детали конструкции ВЭУ;

- повышение растягивающих напряжений и деформации в крепежных узлах и растяжках мачт ВЭУ, приводящее к ослаблению устойчивости конструкции и возможному падению ВЭУ. Толщина ГИО на конструктивных элемента ВЭУ (лопастях, баш-

Таблица 14. Годовая повторяемость сочетаний температуры и скорости ветра

Диапазон V, м/с	Метеорологическая станция Тикси												Повторяемость интервалов T°С, %				
	0-1.99	2-3.99	4-5.99	6-7.99	8-9.99	10-11.99	12-13.99	14-15.99	16-17.99	17-19.99	20-21.99	22-23.99		24-25.99	26-27.99	28-29.99	>30
Диапазон T°С																	
<-55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-55...-50.01	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11
-50...-45.01	84.2	12.9	1.9	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.44
-45...-40.01	70.5	20.5	4.3	2.7	0.9	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.66
-40...-35.01	44.1	26.7	11.5	7.3	3.2	2.9	1.0	0.9	1.10	0.44	0.29	0	0	0	0	0	9.39
-35...-30.01	27.4	26.0	15.9	10.2	6.5	4.7	4.0	2.2	1.51	0.52	0.41	0.17	0	0	0	0	11.85
-30...-25.01	18.3	24.6	14.9	12.8	8.9	7.0	5.2	3.3	1.93	1.74	0.64	0.26	0.13	0	0	0	10.72
-25...-20.01	20.5	23.2	16.4	11.8	8.5	7.7	4.1	3.6	1.87	1.06	0.33	0.08	0.08	0	0	0	8.46
-20...-15.01	11.9	30.6	24.2	13.8	7.6	3.8	2.9	2.3	1.63	0.65	0.43	0.11	0	0	0	0	6.36
-15...-10.01	7.6	30.8	27.7	15.0	7.9	5.1	1.9	1.5	1.76	0.2	0.1	0.1	0	0	0	0	7.06
-10...-5.01	6.1	32.9	29.2	18.9	7.6	3.0	1.5	0.3	0.25	0.17	0.08	0	0	0	0	0	8.14
-5...-0.01	5.63	37.1	35.3	15.0	4.35	1.33	0.8	0.28	0.05	0	0	0	0	0	0	0	14.56
-0-4.99	3.53	41.8	35.5	14.0	3.72	0.95	0.13	0.13	0	0	0	0	0	0	0	0	10.92
5-9.99	2.59	39	37.8	15.5	2.59	1.72	0.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
10-14.99	2.94	33.5	44.7	14.7	3.53	0.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.17
15-19.99	0	8.0	44.0	32.0	12.0	4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17
20-24.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25-29.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Повторяемость интервалов V, %	19.5	30.3	23.2	12.4	5.66	3.46	2.06	1.33	0.9	0.45	0.21	0.07	0.02	0	0	0	100

Таблица 15. Предельные сочетания температуры и скорости ветра, допускающие проведения строительно-монтажных и ремонтных работ с ВЭУ и ВЭС

Диапазон допустимых температур, $T^{\circ}\text{C}$	$<-35^{\circ}\text{C}$	$<-25^{\circ}\text{C}$	$<-15^{\circ}\text{C}$	$<-5^{\circ}\text{C}$
Диапазон допустимых скоростей ветра	$<5\text{ м/с}$	$<10\text{ м/с}$	$<15\text{ м/с}$	$<20\text{ м/с}$

нях, мачтах с растяжками, анемометрах, ЛЭП и пр.) может достигать нескольких сантиметров, а их весовая нагрузка – десятков килограммов на погонный метр или на 1 м^2 площади конструкции;

- колебания тросов, оттяжек, секций мачт и лопастей ВЭУ из-за аэродинамической неустойчивости обтекания профилей, искаженных ГИО;

- увеличение ветровой нагрузки на ВЭУ за счет увеличения их площадей;

- ударные динамические напряжения и вибрации в конструкции ВЭУ, вызываемые осыпанием ГИО с элементов ВЭУ. Разрушение ГИО происходит при повышении температуры, при этом слои гололеда разрушаются по частям без таянья под действием малых перемещений и вибраций;

- вероятность повреждений вокруг ВЭУ, вызываемых падающими и разлетающимися осколками льда, отложенного на лопастях ВК ВЭУ.

Наличие и действие факторов ГИО сводится к простоям ВЭУ в периоды проявления ГИО при отсутствии у ВЭУ антиобледенительных систем или энергетическим и экономическим затратам на системы борьбы с обледенением (при их наличии). Предлагаемым авторами решением проблемы ГИО для ВЭУ является оснащение ВЭУ антиобледенительными системами с малыми затратами энергии, минимизированными с использованием возможностей получения краткосрочных прогнозов опасности ГИО. Для этого ВЭУ следует оснащать автоматизированными системами приема прогнозов опасных погодных явлений из региональных гидрометеорологических центров и использовать их для оптимизации работы и эксплуатации ВЭУ и ВЭС.

ТЕХНИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ ОПТИМАЛЬНОГО АРКВЭУ ДЛЯ УСЛОВИЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Приведенные результаты позволяют сформулировать оптимальные, согласно исследованиям авторов, технические и климатические требования к ВЭУ, эффективно функционирующего в условиях Российской Арктики, в табл. 16.

СООБРАЖЕНИЯ ПО РАЗВИТИЮ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМ АРКВЭУ

Перспективным для создания АркВЭУ нового типа, способного эффективно работать в условиях Российской Арктики, авторам представляется уход от классической схемы ВЭУ с размещением основных агрегатов ВЭУ (мультипликаторов, генераторов, систем обогрева гондолы) в гондоле, устанавливаемой на вершине башни ВЭУ.

Вполне возможным вариантом такого технического решения, разрабатываемого в настоящее время авторами статьи, является перемещение основных агрегатов ВЭУ с высоты башни на землю в утепленные помещения. Реализация такого варианта возможна при использовании механической передачи силового момента ветроколеса АркВЭУ на землю с помощью механического привода с использованием вертикального вала, или гидравлического или пневматического привода.

Утепленное помещение может быть устроено на базе утепленного контейнера, в котором производится транспортировка ВЭУ и оборудования.

Таблица 16. Технические требования к наиболее перспективному АркВЭУ

Наименование показателя АркВЭУ	Значение, описание
Исполнение по ГОСТ 25870-83	ОХ
Номинальная мощность, кВт	50–300
Рабочий диапазон температур, °С	От минус 50 до плюс 40
Диапазон температур “выживания”, °С	От минус 65 до плюс 45
Класс ветра с предельной среднегодовой скоростью $V_{\text{МАКС}}$ и уровнем турбулентности $I_{\text{МАКС}}$	Согласно ГОСТ Р 54418.1-2012 и ГОСТ Р 54418.2-2014
Диапазон рабочих скоростей, м/с	От 4.0–4.5 до 28–30
Скоростной диапазон “выживания”, м/с	До 60–65 при 2-минутном порыве
Стартовая скорость ветра V_0 , м/с	$3.0 \leq V_0 \leq 4.0$
Буревая скорость (отключения) $V_{\text{БУР}}$, м/с	$28 \leq V_{\text{БУР}} \leq 30$
Скорость регулирования $V_{\text{РЕГ}}$, м/с	$12 \leq V_{\text{РЕГ}} \leq 17$
Требования к башне АркВЭУ	Антикоррозийная и морозоустойчивая
Требования к типу фундамента	Свайный
Требования к антиобледенительным мерам	Наличие системы борьбы с ГИО
Требования к системе молниезащиты	Специальная для вечномерзлых грунтов
Сейсмическая устойчивость АркВЭУ	От 6 до 9 баллов по ОСР-2014-А
Требования к периодичности регламентных работ	≈ 1 мес.
Требования к межремонтному периоду	6–7 мес.
Требование к ремонтпригодности АркВЭУ	Круглогодичная, всепогодная
Требования к технологии монтажа-демонтажа ВЭУ и ремонтно-восстановительных работ	Бескрановая, либо с использованием отечественных 25-тонных кранов

Преимуществами предлагаемого решения является достижение всепогодности регламентных работ и большинства видов ремонта, облегчение конструкции фундамента и проведения монтажа и пусконаладки АркВЭУ.

Более революционным уходом от классической схемы конструкции ВЭУ и ВДК является предложенная авторами схема создания бестопливного источника энергии (БИЭН), основанная на получении сжатого воздуха в компрессорных установках с приводом от силовой (с механическим приводом) ВЭУ с последующим его пневматическим аккумулярованием, преобразованием и использованием как энергоносителя для получения электроэнергии и тепла в генераторах турбинного или поршневого типа [3, 20, 21]. Принципиальной новизной разрабатываемой схемы БИЭН является переход от традиционного преобразования на современных ВЭУ энергии ветра в электрическую, с системой электрических аккумуляторов, к более простому и обещающему стать более эффективным преобразованию и аккумулярованию энергии ветра в промежуточный энергоноситель – сжатый воздух и его последующим преобразованием термодинамическими аэродинамическими способами в электрическую и тепловую энергию по заданным графикам нагрузки. Получение и использование тепловой энергии на БИЭН является принципиальным для холодной Арктики.

Функциональная схема и элементный состав БИЭН, защищенные патентом на полезную модель [22], приведены на рис. 11.

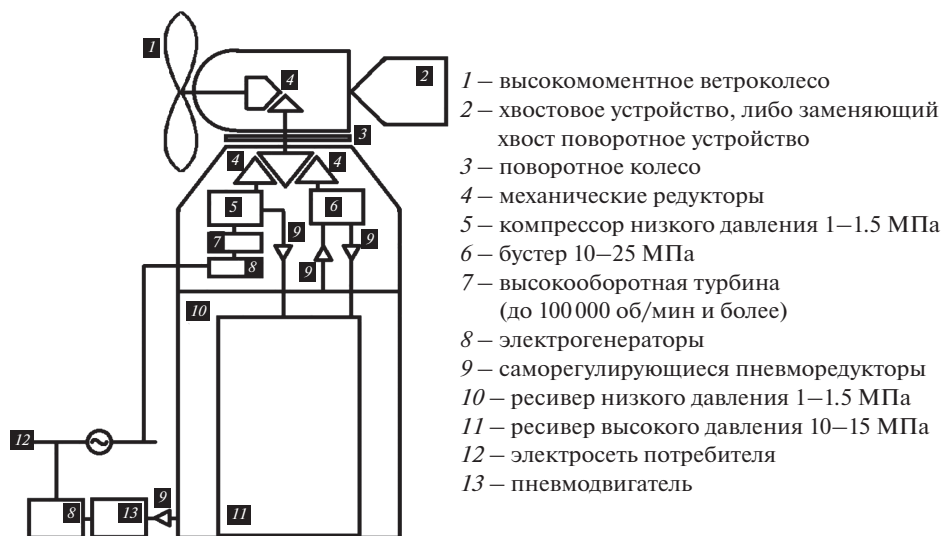


Рис. 11. Функциональная схема и элементный состав БИЭН.

ВЫВОДЫ

Основными выводами данного исследования характеристик ВЭП, климатических условий для АркВЭУ, эффективно функционирующих в условиях Российской Арктики, и конструкционных и технических требований к ним явились следующие.

ВЭП в большинстве пунктов СевМорПути (Диксон, Тикси, Певек, м. Шмидта, Анадырь) достаточен для эффективного промышленного освоения. Среднегодовое число часов работы с номинальной мощностью АркВЭУ предлагаемых конструкций при этом достигает 2500–3300.

Полученные и приведенные результаты подтверждают техническую возможность и экономическую целесообразность создания малотопливных (по схеме ВДК) и бестопливных (по схеме БИЭН) энергоисточников для автономных потребителей российской Арктики на базе АркВЭУ российских разработок.

Полученные и приведенные выше данные и результаты могут представлять интерес при выборе концепции разрабатываемых в России АркВЭУ и автономных энергокомплексов на их основе для Российской Арктики и постановках связанных с этим НИР и ОКР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Показатели распределенной энергетики РФ. Аналитический обзор РЭА. М., 2017. 78 с.
2. Николаев В.Г., Николаев В.В., Харченко В.В. Перспективы и проблемы развития в России ветродизельных энергетических комплексов // Энергетик. 2016. № 3.
3. Сон Э.Е., Николаев В.Г., Кудряшов Ю.И., Николаев В.В. О разработке бестопливных источников энергоснабжения на принципах пневматического преобразования энергии. // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 4.
4. Дьяков А.Ф., Перминов Э.М., Шакарян Ю.Г. Ветроэнергетика России. Состояние и перспективы развития. М., изд. МЭИ, 1996.
5. Вашкевич К.П., Маслов Л.А., Николаев В.Г. Опыт и перспективы развития ветроэнергетики в России. Малая энергетика. 2005. № 1–2. С. 56–67.
6. World Energy Council (WEC) Annual Report 2018. N.Y., 2019.
7. Modern Status of World Renewable Power 2016. Secretariat REN21, Paris, 2017.
8. Small Wind World Report Summary, 2017. Электронный ресурс: www.wwiea.org

9. Юшкова Е.Е., Малицкая Е.А. Применение технологии Блокчейн в сфере альтернативной электроэнергетики в Арктике., М., 2018. 69 с.
10. International Energy Outlook 2017, U.S. Energy Information Administration.
11. Север и Арктика в новой парадигме мирового развития: актуальные проблемы, тенденции, перспективы. Научно-аналитический доклад / Под науч. ред. д.э.н., проф. Селина В.С., д.э.н., проф. Скуфыной Т.П., к.э.н., доц. Башмаковой Е.П., к.э.н., доц. Торопушиной Е.Е. Апатиты: КНЦ РАН, 2016. 420 с.
12. Моргунова М.О., Цуневский А.Я. (под ред. Бушуева В.В.). Энергия Арктики. Издательский центр “Энергия”. М., 2008. 138 с.
13. AEA: Wind System Operating in Alaska. [Электронный ресурс]: // <http://www.aidea.org/aea/programwind system. html> (2017).
14. Ginny Fay, Tobias Schwörer. Alaska Isolated Wind-Diesel Systems: Performance and Economic Analysis Prepared for Alaska Energy Authority. 2010. Institute of Social and Economic Research & University of Alaska, Anchorage, 2010.
15. Wind Powering America: Alaska Wind Resource Map. 2011. Wind and Hydropower Technologies Program: Wind Powering America [Электронный ресурс]: // http://www.eere.energy.gov/windandhydro/wind powering america/maps_template.asp stateabak U.S.
16. Alaska Rural Energy Plan. Prepared for the Alaska Energy Authority. National Renewable Energy Laboratory. 2008.
17. Smith J., Huskey A., Jager D., and Hur J. Wind Turbine Generator System Power Performance Test Report. Technical Report NREL/TP-5000-51392 May 2011. US, NREL, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy.
18. Global Surface Summary of the Day, [Электронный ресурс]: // <http://www.ncdc.noaa.gov/ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/daily/readme.txt>
19. Новый аэроклиматический справочник ПСА над СССР / Под ред. Гутермана И.Г. Т. II. М.: Гидрометеиздат, 1979.
20. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., Николаев В.В. К развитию моделей высотного профиля скорости ветра в приземном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 147–159.
21. Николаев В.Г. Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития и использования ветроэнергетики в России. Изд-во “АТМОГРАФ”, 2010. 430 с.
22. Кудряшов Ю.И., Николаев В.Г., Николаев В.В., Сон Э.Е. Патент на изобретение № 614451: Автономный источник энергоснабжения на основе ветросиловой установки. Зарегистрирован Федеральной Службой по интеллектуальной собственности в ГосРеестре изобретений РФ 28.03.2017.

To the Choice of Optimal Construction Schemes and Parameters of Wind Turbines for the Russian Arctic

E. E. Son^a, S. V. Ganaga^b, V. G. Nikolaev^{c, *}, and Yu. I. Kudryashov^c

^a*Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Research Institute Transneft, Moscow, Russia*

^c*Scientific and Information Center “Atmograph”, Moscow, Russia*

**e-mail: atmograph@gmail.com*

A review and analysis of geo-climatic, technical and other information on the implemented projects and on the conditions, possibilities and limitations of the wind turbines (WT) and wind-diesel power systems (WDS) operation in conditions of Alaska and Russian Arctic was carried out. The wind-climatic, technical and operational requirements for the Arctic version of the wind turbines (ArcWT) are established as well as ways of their implementation. New promising ArcWT technical schemes for autonomous power supply of Arctic and northern consumers are proposed. The actual unsolved scientific and technological problems of the creation and effective use of ArcWT in Russia are given.

Keywords: wind-climatic conditions, autonomous power supply, wind turbines, wind-diesel power plants, electric power, thermal energy, energy storage, pneumatic energy, compressors, air turbines, transmission, conversion efficiency, power load