

К разработке автономных систем энергоснабжения для российского Заполярья.

Ганага С.В., к.т.н., Кудряшов Ю.И., д.ф.-м.н., Николаев В.Г.,
д.т.н., Николаев В.В., Сон Э.Е., д.ф.-м.н., Сон К. Э., к.ф.-м.н.

Статья посвящена оценке возможностей и проблем реализации безтопливного энергоснабжения потребителей арктической зоны России на базе совместного использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) и прогрессивных систем пневматической аккумуляции и преобразования энергии. Материалы и выводы статьи основаны на результатах исследования и разработки коллектива ИВТАН РАН в рамках Программы РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития арктической зоны Российской Федерации».

Актуальность работы связана с необходимостью кардинального повышения автономности, надежности, экономичности, экологической безопасности энергоснабжения промышленных, технологических и военных объектов и населения в изолированных пунктах российской Арктики и отсутствием в России и в мире обоснованных научно-технических эффективных решений проблем автономного энергоснабжения локальных потребителей энергии в арктических условиях. Важность исследования для государства в целом в случае успеха в решении поставленных в работе задач связана с возможностью повышения энергетической безопасности и снижения объемов Северного Завоза. Экономичное и экологически чистое энергообеспечение объектов Северного Морского Пути и арктической зоны РФ является одной из ключевых проблем освоения Арктики в XXI веке.

Практический опыт эффективного (надежного и экономичного) использования автономных источников энергоснабжения потребителей в арктической зоне на базе совмещения ВЭУ и систем аккумуляции и преобразования энергии на пневматическом принципе в мире в настоящее

время отсутствует.

Проведенное авторами исследование нацелено на разработку научных принципов, практических технических решений и опытного образца автономного энергетического комплекса, построенного на базе передовых российских и мировых технологий получения сжатого воздуха с использованием ВЭУ нового типа и его пневматического преобразования, аккумулирования и использования в качестве энергоносителя для гарантированного безтопливного получения электроэнергии и тепла.

Основными проблемами и соответственно этапами научно-технического поиска и разработки энергетических источников, предлагаемых авторами, является теоретическое и экспериментальное исследование:

- климатических факторов, ветроэнергетического потенциала (ВЭП) арктической зоны России применительно к разработке ВЭУ в северном исполнении и аккумулирующих энергию пневматических систем новых типов и назначения;
- разработка принципиальных схем и технического облика ВЭУ для работы в ветроклиматических условиях российской Арктики;
- поиск и разработка принципиальных и технических схем высокоэффективных систем и прогрессивных технологий получения сжатого воздуха и его пневматического преобразования, аккумулирования и использования в качестве эффективного энергоносителя для получения электроэнергии и тепла;
- техническое подтверждение возможности практической реализации теоретически полученных научно-технических принципов на основе разработки функциональной схемы и создания опытного образца энергетического комплекса электрической мощности $8 \div 10$ кВт;
- технико-экономическое обоснование инвестиций перспективных схем энергоснабжения на разработанных принципах ряда портов СевМорПути с

учетом установленных в работе местных ветроклиматических факторов и параметров энергоснабжения; определения объема рынка сбыта разработанного энергетического комплекса.

Эффективность и достоверность достижения целей настоящей работы обеспечивается использованием максимально эффективных и достоверных методик определения климатических характеристик ВЭП и эффективности ВЭУ в заданных пунктах российского Заполярья и выбором на этой основе оптимального состава и параметров (типоразмеров, мощности, емкости, конструкционных особенностей, ремонтпригодности и пр.) автономного энергетического комплекса на базе ВЭУ и аккумулирующих энергию устройств с использованием сжатого воздуха в качестве энергоносителя.

В ходе работы авторами были получены следующие результаты.

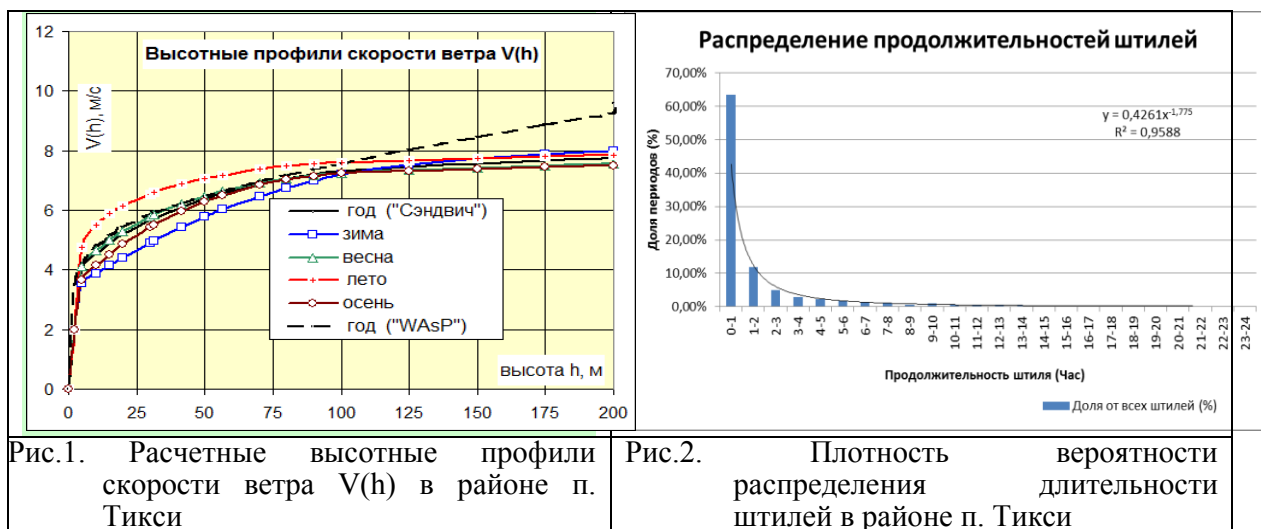
Применительно к определению технических требований к ВЭУ и системам аккумулирования сжатого воздуха проведена разработка методик моделирования временной и пространственной изменчивости ВЭП в полярных районах. Разработанные методики определения временной краткосрочной (масштабов от минут до суток) и сезонной и пространственной (территориальной и высотной) изменчивости и модели ветроклиматических условий и ВЭП в опорных пунктах Северного Морского Пути основаны на физико-статистическом моделировании на базе комплексного использования данных о пограничном слое атмосферы (давлении, температуре, плотности, влажности, ветре, турбулентности, опасных для техники метеорологических явлениях и пр.) и геофизических характеристиках Земли (рельефе, подстилающей поверхности, грунтах, вечной мерзлоты и пр.), полученных и получаемых в ходе многолетних сетевых и специальных краткосрочных метеорологических, аэрологических (шаропилотных), спутниковых, экспедиционных геологических и геофизических изысканий [1, 2].

Ветровой режим в исследуемой в данной работе заполярной зоне

России определялся и оценивался теоретически моделированием ВЭП и мощности ВЭУ по данным измерений ветра и термодинамических параметров ПСА на сети государственных метеорологических (числом до 600) и аэрологических (около 60) станций России и бывшего СССР (базовые периоды от 10 до 40 лет) и специализированных под задачи ветроэнергетики краткосрочных (за 1 – 2 года) трехуровневых измерений на метеорологических мачтах в высотном диапазоне 10 – 60 м (ветровой разведки) в отдельных пунктах российского заполярья, проведенных в разные годы силами РАО ЭС Востока [2].

Разработанные методики обеспечивают теоретическое высокоточное (с погрешностью не выше 15 – 18 %) моделирование параметров ВЭП в любой заданной координатной точке на территории российского заполярья и определение параметров временной изменчивости с масштабами от нескольких минут до сезонных и межгодовых. Методики отлажены и апробированы на примере важнейших опорных пунктов Северного Морского Пути: Тикси, Певек, мыс Шмидта, Анадырь. Для примера на рисунках 1 и 2 приведены графики рассчитанных средних многолетних сезонных вертикальных профилей и функций распределения скоростей ветра в районе поселка Тикси, а также результаты исследования кратковременных (с минутным и суточным масштабом) пульсаций скоростей ветра.

На базе разработанной методики в исследуемых пунктах определены ветроклиматические условия функционирования и технические характеристики и требования к базовым ВЭУ, а также определены с учетом графиков нагрузки необходимые объемы и технические параметры системы аккумулирования сжатого воздуха и компрессорных установок для прототипа автономного энергетического комплекса гарантированного безтопливного получения электроэнергии и тепла с использованием сжатого воздуха как энергоносителя.



Основными результатами и выводами этапа разработки методики моделирования и определения с ее помощью пространственно–временной структуры ВЭП и климатических условий функционирования заполярных источников гарантированного энергоснабжения (ИГАЭС) на базе ВЭУ и систем аккумулирования сжатого воздуха, а также конструкционных и технических требований к ним явились:

- ВЭП в большинстве пунктов СевМорПути (Диксон, Тикси, Певек, м. Шмидта, Анадырь) достаточен по международным критериям для эффективного промышленного освоения. Среднегодовые скорости и удельные мощности ветра в районе ряда портов Северного Морского Пути составляют соответственно от 7 до 9 м/с и от 550 до 900 Вт/м², а годовое число часов работы с номинальной мощностью наиболее совершенных в настоящее время ВЭУ при этом может достигать 2500 – 3300.
- Для разработки заполярных ИГАЭС требуется создание специализированных под северные ветро-климатические и геофизические условия (низкие температуры, высокая турбулентность, вечная мерзлота и пр.) отсутствующих в настоящее время ВЭУ и технологий работы с ними.
- Функции вероятности распределения ветра по скоростям, установленные в работе статистическим анализом временных рядов многолетних метеорологических и аэрологических 4-х и 8-ми срочных сетевых измерений и краткосрочных данных ветровой разведки с 10-минутным

разрешением, позволили установить с высокой достоверностью длительность интервалов с достаточной мощностью ветра, а также периодов безветрия и слабого ВЭП (менее потребляемой мощности ИГАЭС с длительностью, варьирующейся вдоль Северного Морского Пути и в разные сезоны от 36 до 72 часов.

В плане разработки физических принципов, принципиальных схем ИГАЭС и определение технических параметров ее элементов и требований к ним проведены следующие работы по разработке принципиальной схемы ИГАЭС на базе ВЭУ и систем аккумулирования, подачи и преобразования энергоносителя – сжатого воздуха и получены следующие результаты:

- На основе анализа графиков потребления электроэнергии и тепла промышленными и жилыми объектами российского заполярья установлены критерии оценки энергетической эффективности и требования к техническим и энергетическим характеристикам ИГАЭС в целом и их принципиальным составляющим.
- Разработаны идеологическая основа, физические принципы и принципиальная схема функционирования ИГАЭС на базе ВЭУ и пневматического преобразования энергии ветра в электроэнергию и тепло для работы в условиях российской Арктики и поэлементный ее состав (рис. 3).
- Определены основные физико-технические и энергетические параметры основных компонент (технические характеристики и мощности ветроэнергетической установки, необходимые объемы системы аккумулирования, технических параметров пневмодвигателя и электрогенератора) прототипа ИГАЭС.
- Проведен информационный поиск аналогов отдельных элементов, составляющих основу ИГАЭС (ВЭУ, воздушных компрессоров различного типа, газгольдеров высокого давления, регулирующей давление аппаратуры, пневмодвигателей поршневого и турбинного типа, электрических генераторов, систем преобразования и контроля качества

ЭлЭн и пр.) и проведен анализ их энергетических характеристик и оценки возможных потерь в каждом из них и их совокупности в целом [4, 5, 6].

Рис. 3. Принципиальная схема ИГАЭС

	Элемент энергокомплекса	Функциональное назначение
1	Ветроэнергетическая силовая установка	обеспечивает работу компрессорной системы высокого давления большой производительности
	↓	
2	Компрессорная система высокого давления (до 5 – 10 Па) большой (до сотен м ³ /мин) производительности сжатого воздуха	обеспечивает наполнение большого (достаточного для энергообеспечения на случай возможных 2–3-суточных ветроэнергетических штилей) ресивера сжатым воздухом под высоким давлением (до 10 Па)
	↓	
3	система пневматического отвода и распределения тепла	обеспечивает пневмопередачу тепла системе обогрева энергокомплекса, на осушитель воздуха, пневмотурбину и потребителю
	↓	
4	осушитель воздуха	обеспечивает осушение воздуха
	↓	
5	ресивер-аккумулятор сжатого воздуха	содержит сжатый воздух под большим и переменным давлением
	↓	
6	дрессельный регулятор	Обеспечивает подачу воздуха на пневмодвигатель с заданным давлением порядка 0.6 – 1.0 Па
	↓	
7	Пневмодвигатель: вихревая турбина высокой эффективности с системой отвода холода потребителю	Обеспечивает вращение вала электрогенератора с постоянной скоростью и отвод холодного воздуха потребителю
	↓	
8	Высокоэффективный электрический генератор	Работает с постоянными или переменными оборотами и обеспечивает гарантированную выработку и подачу электроэнергии потребителю

На основе проведенного информационного анализа было установлено:

- Разработанные аналоги предлагаемой схемы ИГАЭС отсутствуют. Аналоги составляющих основу ИГАЭС отдельных элементов (ВЭУ, компрессоров, газгольдеров и редукторов высокого давления, пневмодвигателей, электрогенераторов и пр.) разработаны, производятся, широко и разнообразно (по типам, размерам, конструкции, энергетической эффективности и ценам) представлены на рынке и могут быть использованы для разработки экспериментального прообраза ИГАЭС. Возможные варианты их типоразмеров, состава и компоновки в прообразе ИГАЭС многочисленны и допускают большие возможности для энергетической и экономической оптимизации.
- Для разработки заполняемых ИГАЭС требуется создание отсутствующих

в настоящее время ВЭУ, специализированных под схему ИГАЭС (высокий развиваемый момент и избыточная по сравнению с потребляемой мощностью), допускающих возможность строительства и обладающих высокой технической готовностью, эксплуатационными и ремонтными характеристиками в условиях российского заполярья (низкие температуры, высокая удельный импульс и порывистость ветра, вечная мерзлота и пр.).

– Мощность ВЭУ и системы аккумулирования, подачи и преобразования энергоносителя для ИГАЭС (сжатого воздуха) должны обеспечивать гарантированную выработку электроэнергии и, по возможности, тепла по заданному графику нагрузки в течении всего года, в том числе в периоды безветрия и слабого (менее требуемой потребителю мощности) ВЭП с длительностью, варьирующейся для разных пунктов вдоль СевМорПути от 36 до 60 часов.

– Проведенные термодинамические оценки показывают, что потенциальная энергия 1 м³ воздуха, сжатого до давления 100 атм (промышленная технология производства и хранения которого освоена), составляет около 107 Дж (2.8 кВт·ч), а освоенные технологии его преобразования в электроэнергию с КПД порядка 0.7 позволяют получить до 2 кВт·ч. Для оценки, для ИГАЭС гарантированной мощности 100 кВт объем сжатого до 100 атм воздуха, запасенного на случай 48 часового (2-х суточного) безветрия составит 2400 м³.

– Современные компрессорные установки высокого давления, наиболее перспективными из которых для ИГАЭС могут оказаться винтовые, имеют КПД порядка 0.7. Соответственно минимальная средняя мощность, передаваемая от ВЭУ на вал двигателя компрессора ИГАЭС с гарантированной мощностью 100 кВт, обеспечивающая покрытие графика нагрузки, должна составлять около 200 – 220 кВт, а с учетом установленной для заполярья вероятности длительных затиший и энергетической эффективности ВЭУ, двигатель компрессора должен быть обеспечен в примерно полутора–кратным запасом мощности, то есть

порядка 300 – 330 кВт.

– С учетом предыдущих оценок, установленная мощность ВЭУ в составе ИГАЭС, работающая в качестве механического привода компрессорной установки, для гарантированного покрытия графика нагрузки мощностью 100 кВт, должна составлять 900 – 1000 кВт.

Оценки экономических показателей разработанной схемы ИГАЭС и их сравнения с альтернативными способами энергоснабжения проведены с учетом экономических показателей современных ветроэнергетических технологий [7] на примере п. Тикси – одного из основных портов Северного Морского Пути и перевалочного пункта авиационных сообщения центра РФ с российским сибирским и дальневосточным заполярьем (рис. 4).

1	ДЭС х 2 2х800 \$/кВт	+	Сист. подачи 200 \$ / кВт					=	Источник ЭлЭн 1800 \$ /кВт
2	ГТУ 650 \$/кВт	+	Сист. подачи 650 \$/кВт					=	Источник ЭлЭн 1300 \$ /кВт
3	ПнТУ 600 \$ / кВт	+	ВЭУ 2400 \$ / кВт	+	Ресивер 600 \$ / кВт	+	Сист. подачи 200 \$ / кВт	=	Источник ЭлЭн 3800 \$ /кВт
4	ВЭУ 2000 \$ / кВт	+	ДЭС х 2 2х800 \$/кВт	+	Эл. Аккумуля. 800 \$ / кВт	+	Сист. Управл. 300 \$ / кВт	=	Источник ЭлЭн 4700 \$ /кВт

Рис. 4. Оценка капитальных затрат возможных способов энергоснабжения:
1 – ДЭС, 2 – ГТУ, 3 – ИГАЭС, 4 – ВДЭК

Согласно проведенным оценкам экономических показателей разработанной схемы ИГАЭС и их сравнения с альтернативными способами энергоснабжения, удельные (на 1 кВт установленной мощности) капитальные затраты ИГАЭС на базе ВЭУ с механическим приводом и пневматической аккумуляцией и преобразованием энергии может оказаться примерно на 20 – 25 % ниже, чем у наиболее часто рассматриваемых ветро-дизельных комплексов с электрическими аккумуляторами.

Удельные капитальные затраты ИГАЭС предлагаемой авторами схемы окажутся в два – три раза выше, чем у ВДЭК и ГТУ без систем аккумулирования энергии, однако с учетом топливной составляющей последних (от 8 руб./кВт·ч и выше) во многих пунктах Северного Морского Пути себестоимость электроэнергии ИГАЭС может оказаться в полтора – два раза ниже таковой у ДЭС.

Ввиду полученных в данной НИР результатов, подтверждающих перспективность предложенной принципиальной схемы ИГАЭС на базе ВЭС и систем пневматического аккумулирования и преобразования энергии, представляется целесообразным продолжить научно-техническую и конструкторскую разработку схемы ИГАЭС и ее экономическому обоснованию. Для технического подтверждения возможности и практической реализуемости теоретически полученных научно-технических принципов и результатов предлагается разработать экспериментальный образец ИГАЭС электрической мощности $8 \div 10$ кВт.

Разработанные в данной НИР результаты обосновывают и подтверждают техническую и экономическую целесообразность создания безтопливного энергоисточника нового типа на базе ВЭУ и систем пневматического аккумулирования и преобразования энергии.

Практическая значимость разработанной и предлагаемой технологии обусловлена следующими возможностями:

- экономии (до 100 %) дизельного топлива и кардинального сокращения объемов “северного завоза”;
- снижения тарифов на электроэнергию и тепло в изолированных районах Российской Федерации;
- использования российской технологической и производственной базы для серийного выпуска разработанного энергетического комплекса и организация новых высокотехнологичных рабочих мест;
- решения проблемы энергетической безопасности РФ за счет

автономности энергоснабжения на неисчерпаемом ресурсе (воздухе) и импортозамещения дизельных станций;
– решения экологических проблем Севера.

Источники информации.

1. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов РФ и методические основы их определения. “Атмограф”, М., 2008, 590 с.
2. Николаев В.Г. Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития и использования ветроэнергетики в России. “Атмограф”, 2011. 502 с.
3. Николаев В.Г., Ганага С.В., Перминов Э.М. Перспективы развития мировой и отечественной ветроэнергетики. Приложение к журналу “Энергетик”. 2012, Выпуск 8, 9, 10, М., НТФ “Энергопрогресс”, 313 с.
4. Шефтер Я.И.. Ветроэнергетические агрегаты. М., “Машиностроение”, 1972, 288 с.
5. Левин В. И. Профессии сжатого воздуха и вакуума. — М.: Машиностроение, 1989. 256 с.
6. European Wind Farm Project Cost. History and Projection. 2008. Garrad Hassan – Enova. 2009.
7. Wind Energy – The Facts. A Guide to the Technology, Economics and Future of Wind Power. European Wind Energy Association (EWEA). Earthscan. London. 2009.