

УДК 621.31 (985)

**В.М. Зайченко, А.А. Чернявский, Н.Л. Новиков, А.Н. Новиков<sup>1</sup>**

### **СТРАТЕГИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ**

*Аннотация.* В целях совершенствования системы государственного управления социально-экономическим развитием Арктической зоны Российской Федерации Стратегией развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности в числе важнейших направлений предусмотрено развитие систем электроснабжения, включая сооружение атомных теплоэлектростанций, в том числе плавучих, повышение энергоэффективности, расширение использования возобновляемых источников энергии, а также обеспечение энергонезависимости удаленных малых населенных пунктов.

В настоящее время существуют реальные возможности, научно и технически обоснованные решения, которые позволят на 30-35% обеспечить потребности Арктики теплом и электроэнергией от ВИЭ. Многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии (НЭ) и солнечными фотоэлементами, обеспечивающими совместное производство электроэнергии, тепла с помощью распределенных энергонагревателей, и холода с помощью тепловых насосов, со звеном переменного и постоянного тока может стать базовой основой автономного энергоснабжения потребителей, прежде всего, районов Арктики.

Создание интеллектуальных интегрированных систем сетевидной архитектуры одновременного производства электроэнергии, тепла и холода на базе высокоэффективных модульных малых и плавучих АЭС является важнейшей стратегической задачей инновационного развития электроэнергетики в Арктической зоне России.

*Ключевые слова:* электроэнергетика, Арктика, многофункциональный энергетический комплекс, модульные малые и плавучие АЭС, интеллектуальная интегрированная система сетевидной архитектуры.

**V.M. Zaychenko, A.A. Chernyavsky, N.L. Novikov, A.N. Novikov<sup>2</sup>**

### **INNOVATIVE DEVELOPMENT STRATEGY FOR ELECTRIC POWER INDUSTRY IN THE RUSSIAN ARCTIC ZONE**

*Abstract.* In order to improve the system of government control over socioeconomic development of the Russian Arctic zone, the Strategy of Russian Arctic Zone Development and National Security Protection provides, among the key focus areas, for electric supply system development that includes building on-shore and floating nuclear heat and power plants, improving energy efficiency, enhancing renewable energy sources utilization, as well as providing energy self-sufficiency of remote small settlements.

Nowadays we have real opportunities, scientifically and technically justified solutions to cover 30-35% of the Arctic heat and electricity requirements using the RES. A multifunctional energy complex (MEC) based on a hybrid wind-diesel power plant with an energy storage (ES) and solar cells providing combined generation of electricity, heat using distributed energy heaters, and cold using heat pumps, with an AC and DC link can serve as a core basis for self-generated power supply for consumers, mainly in the Arctic regions.

Creating smart integrated grid architecture systems for simultaneous electricity, heat and cold generation based on high-performance modular small and floating NPPs is a key strategic objective of innovative power industry development in the Russian Arctic zone.

*Keywords:* electric power industry, Arctic, multifunctional energy complex, modular small and floating NPPs, smart integrated grid architecture systems.

---

<sup>1</sup> Виктор Михайлович Зайченко – заведующий отделом распределенных энергетических систем, д.т.н., *e-mail:* zaitch@oivtran.ru;

Адольф Александрович Чернявский – ведущий научный сотрудник, к.т.н.;

Николай Леонтьевич Новиков – ведущий научный сотрудник, д.т.н., профессор, *e-mail:* novikov\_nl@ntc-power.ru;

Александр Николаевич Новиков – научный сотрудник, *e-mail:* novikov\_an@ntc-power.ru;

ФГБУН Объединенный институт высоких температур (ОИВТ) РАН.

<sup>2</sup> Viktor M. Zaychenko – Head of the Distributed Energy System Department, Doctor of Engineering, *e-mail:* zaitch@oivtran.ru;

Adolf A. Chernyavsky – Leading Researcher, PhD in Engineering;

Nikolay L. Novikov – Leading Researcher, Doctor of Engineering, Full Professor, *e-mail:* novikov\_nl@ntc-power.ru;

Alexander N. Novikov – Researcher, *e-mail:* novikov\_an@ntc-power.ru;

Federal Publicly Funded Institution of Science Joint Institute for High Temperatures (JIHT) of the Russian Academy of Sciences.

---

### Актуальность проблемы

В энергетическом обеспечении отдаленных и труднодоступных регионов Российской Федерации важная роль принадлежит малой энергетике, обеспечивающей электрической и тепловой энергией 70% ее территории.

Арктика весьма богата полезными ископаемыми, прежде всего нефтью и газом. В арктической зоне находится 13% мировых запасов нефти, 30% природного газа, 20% газоконденсата [1]. При этом 16% этих богатств находится на сухопутной территории арктических государств и 84% – на шельфе Северного Ледовитого океана. Значительная часть этих богатств принадлежит России.

По оценке Минприроды России, начальные извлекаемые суммарные ресурсы арктической зоны составляют 258 млрд т условного топлива. В то же время в Арктике пока остаются неразведанными более 90% шельфа и порядка 53% территории на суше. На территории Арктической зоны России расположено 385 месторождений углеводородного сырья. Добыча нефти в Арктике в 2015 г. составила 82,5 млн т (15,5% от общероссийской), газа – 516,2 млрд м<sup>3</sup> (81,2%).

Самый крупный новый проект, реализуемый сейчас на территории арктической зоны, – «Ямал СПГ». Планируемая мощность завода по производству СПГ – 16,5 млн т год. Строительство завода предполагается в три очереди по 5-5,5 млн т СПГ каждая. Ввод первой очереди запланирован на 2017 год.

По данным Минэнерго РФ, в ближайшей перспективе планируется ввести в разработку несколько месторождений, расположенных на суше арктической зоны. Очевидно, что для освоения таких объемов трудноизвлекаемых ресурсов, да еще в сложных климатических условиях, потребуются эффективные решения по энергоснабжению, причем не только объектов на самих месторождениях, но и сопутствующей инфраструктуры, в том числе населенных пунктов. В этой связи в арктической зоне хорошей альтернативой традиционным источникам энергии является использование ВИЭ.

Эксперты Greenpeace и другие специалисты прогнозируют, что к 2030 г. возобновляемые источники энергии будут удовлетворять 40% ми-

рового спроса на энергию. При этом ни один из секторов энергетики не развивается так быстро, как ветровая и солнечная энергетика: ежегодно они растут на 30-35%.

Главная цель строительства и эксплуатации объектов возобновляемой энергетики на Крайнем Севере и в Арктике – экономия ресурсов при энергоснабжении потребителей. «Отдаленность и труднодоступность населенных пунктов, неразвитая инфраструктура, сложная логистика ведут к серьезному удорожанию топлива для дизельных станций. Так, около 60% себестоимости вырабатываемой электроэнергии приходится на топливную составляющую. Установка на отдаленных энергоучастках объектов возобновляемой энергетики приводит к сокращению затрат, что делает реализацию проектов ВИЭ экономически эффективной», – сообщает якутское информагентство SakhaNews.

Для развития солнечной энергетики в России в последние годы созданы необходимые условия: ряд отечественных предприятий освоил в достаточно больших объемах серийный выпуск весьма эффективных и недорогих фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), работающих в широком диапазоне температур окружающего воздуха. Причем чем ниже эта температура, тем эффективнее работают ФЭП, что хорошо соответствует условиям Арктики. Вместе с тем полугодовой период полярной ночи ведет к необходимости решать вопросы долговременного аккумулирования больших количеств электроэнергии. И сегодня эти вопросы активно решаются и в мире, и в России. Появились такие электрохимические аккумуляторы, как редокс-ванадиевые, цинк-воздушные и т.п., имеющие срок службы до 30 лет, малую удельную массу на 1 кВт·ч запасаемой энергии, саморазряд не более 1-2% в год, большое количество допустимых циклов заряда-разряда и допускающие почти полный разряд при работе без потери энергетической емкости. Такие аккумуляторы позволяют осуществить круглогодичное энергообеспечение потребителей мощностью до 10-100 кВт.

Весьма эффективным может стать комбинированное использование энергии Солнца и ветра. Летом эффективно работают ФЭП, зимой – ВЭУ. И при этом оказывается возможным ис-

пользовать системы аккумулирования электроэнергии с минимально-возможной емкостью и стоимостью [2]. Такие комбинированные системы могут обеспечить надежное гарантированное энергоснабжение для потребителей первой и особой первой категорий, например, для военного оборудования, радиолокационных станций, систем передачи информации, больниц, школ и т.п.

С успехом может быть использована и энергия биомассы в арктической зоне: бросовые отходы лесоперерабатывающих и деревообрабатывающих предприятий, сельскохозяйственных предприятий, биоотходы различных производств и хозяйственно-бытовые отходы. Новые высокоэффективные технологии конверсии таких отходов в электрическую и тепловую энергию без вредных выбросов в окружающую среду предложены ОИВТ РАН [2].

В связи с тем, что размещение в Арктике поселений и промышленных предприятий рассредоточено на больших территориях – нет смысла заниматься здесь созданием систем централизованного энергоснабжения потребителей. Более целесообразным можно считать создание в Арктике автономных распределенных систем энергообеспечения на базе ВИЭ, приближенных к потребителям и призванных заместить существующие дизельгенераторные установки (ДГУ), требующие ежегодного завоза дорогостоящего дизельного топлива и нарушающие хрупкое экологическое равновесие северных территорий. На топливоснабжение арктических территорий ежегодно расходуется более 110 млрд руб. [3]. При этом северный завоз топлива практически удваивает его стоимость. А себестоимость генерируемой на ДГУ электроэнергии доходит до 40-100 руб./кВт.ч. Поэтому, несмотря на требуемые немалые инвестиции на внедрение систем с ВИЭ, все затраты будут окупаться в короткие сроки при высокой финансово-коммерческой эффективности как для инвесторов, так и для территориального и федерального бюджетов.

Внедрение новых технологий в малой энергетике, направленных на повышение эффективности работы оборудования, экономию топлива, обеспечение надежности и качества электроснабжения является важной и актуальной за-

дачей, решение которой позволяет произвести улучшение по заданному критерию качества работы системы, такому как экономический, технический, функциональный.

На основе анализа проблем, стоящих перед малой и нетрадиционной энергетикой, можно сформулировать основные технические требования к автономным системам энергоснабжения (АСЭС):

- 1) многофункциональность;
- 2) комбинирование состава источников энергии (гибридные энергоустановки);
- 3) модульная компоновка на основе типизации и конструктивной унификации;
- 4) автономная работа энергетических модулей;
- 5) согласованность характеристик энергетических модулей, в том числе дизеля, генератора и потребителя нагрузок;
- 6) возможность совместной работы дизельной электростанции (ДЭС) с нетрадиционными источниками энергии (гибридная электростанция), а также с энергосистемой;
- 7) обеспечение высокого качества электрической и тепловой энергии независимо от колебаний нагрузки и потенциала возобновляемых видов энергии;
- 8) надежность, ресурс и эффективность функционирования АСЭС;
- 9) обеспечение безопасности и удобства работы оператора ДЭС;
- 10) типизация и унификация парка ДЭС, энергетического оборудования и комплектующих, топлив и моторных масел;
- 11) высокий уровень автоматизации и диспетчеризации.

### **Многофункциональный энергетический комплекс на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии и солнечными фотоэлементами**

Для реализации указанных требований предлагается многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии и солнечными фотоэлементами, обеспечивающими совместное производство электроэнергии, тепла с помощью энергонагревателей,

и холода с помощью тепловых насосов, со звеном переменного и постоянного тока.

Гибридная ветродизельная установка с накопителем электроэнергии (НЭ) может стать основой автономного энергоснабжения потребителей, прежде всего, районов Севера (Арктики).

Для обеспечения согласованности работы энергетических модулей в составе установки предусматриваются следующие основные модули:

- ДЭС;
- ветроэлектроустановка (ВЭУ);
- статический преобразователь частоты (ПЧ);
- накопитель электроэнергии (НЭ);
- система автоматического управления (САУ).

Первичный двигатель является основным энергетическим модулем электростанции. От его свойств и характеристик зависят надежность и долговечность, качество электрической энергии и стабильность ее параметров в статическом и динамическом режимах и т.д.

В настоящее время работа ДЭС протекает в условиях несогласованного изменения мощности потребителя с частотой вращения двигателя. Нагрузка на генераторе вообще может отсутствовать или изменяться от любого частичного до максимального значения. При этом показатели работы двигателя (мощность, частота вращения, часовой и удельный расходы топлива, крутящий момент или среднее эффективное давление), как правило, не являются оптимальными. Это обусловлено несовершенством общих конструктивно-компоновочных решений ДЭС.

Диапазон изменений каждого параметра двигателя ограничивается его прочностными, тепловыми и газодинамическими возможностями. Например, частота вращения двигателя может изменяться в ограниченных пределах. Ряд факторов не позволяет превышать заданную максимальную угловую скорость коленчатого вала, так как это влечет за собой превышение допустимых значений сил инерции в деталях двигателя, приводит к ухудшению качества протекания рабочих процессов в цилиндре двигателя, увеличивает термическое перенапряжение деталей двигателя и т.п.

В некоторых случаях двигателю приходится работать при самой малой частоте вращения

вала (например, при отсутствии или минимальной нагрузке). При этом скоростной режим должен быть таким, чтобы дизель работал устойчиво (без пропусков и перебоев) в режиме минимума удельного расхода топлива.

Следует отметить, что скоростные режимы ДЭС ограничены не только верхними и нижними пределами по частоте вращения вала дизеля, но и, соответственно, пределами по частоте вращения генератора.

Использование преобразователя частоты и САУ в составе ДЭС позволит наделять ее новыми положительными свойствами:

- 1) снятие требования на соответствие частоты вращения двигателя синхронной частоте вращения генератора;
- 2) простота и надежность обеспечения параллельной работы ДЭС с энергосистемой и нетрадиционными источниками энергии;
- 3) энергетическая эффективность и топливная экономичность ДЭС за счет перехода двигателя на частичные скоростные характеристики при нагрузках потребителя отличных от номинальной;
- 4) повышение ресурса двигателя за счет снижения его оборотов.

Создание МЭК на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии является актуальной задачей. Новизна такого подхода заключается в наличии управляемых преобразователей с накопительными элементами в системе генерации, позволяющего сократить неэффективное использование ветродизельной установки при циклических изменениях нагрузки, генерации и аварийных ситуациях, включая поддержание режимов параллельной работы дизельных и ветроэнергетических установок с улучшением показателей качества электроэнергии.

### Научная и практическая значимость работы

Разработанный многофункциональный энергетический комплекс обеспечит выполнение основных технических требований к автономным системам энергоснабжения (АСЭС) для условий Арктики с высокими экономическими показателями. Топливная экономичность первичного дизеля в составе МЭК с оптимизацией скоростного режима с переменными оборотами может

достигать 27%. Экономия топлива за счет применения СНЭ может достигать 25%. Экономия топлива за счет применения ВЭУ может достигать 40%. Экономия топлива за счет применения фотовольтаики может достигать 25%.

В настоящее время одобрена Программа развития возобновляемых источников энергии холдинга ОАО «РАО Энергетические системы Востока» на период до 2020 года. Основным стимулом для изучения потенциала ВИЭ в Дальневосточном федеральном округе (ДФО) стала специфика, связанная с труднодоступностью многих районов округа для централизованного энергоснабжения. При подготовке Программы были проведены экономические расчеты для более чем 170 населенных пунктов во всех регионах ДФО. Особенно важна задача надежного энергообеспечения для Чукотского АО по причине:

- высокой доли транспортных расходов, сложных логистических схем (с наличием многочисленных перевалок с одного вида транспорта на другой) и сезонного характера доставки топлива из-за коротких сроков навигации;
- неоптимальных структур топливного баланса, приводящая к значительным затратам на дизельное топливо;
- значительной неравномерности суточных графиков электрических нагрузок ввиду значительной доли коммунально-бытового энергопотребления, как следствие, – повышенная нагрузка и износ оборудования, высокие удельные расходы топлива;
- суровых природно-климатических условий эксплуатации производственных фондов;
- значительных ежегодных размеров кредитных ресурсов, привлекаемых для завоза дизельного топлива, существенно снижающих финансовую устойчивость предприятий;
- высокой стоимости производства энергии и высоких тарифов.

Полученный опыт при выполнении работы по созданию МЭК может быть использован для Чукотского АО в семи пилотных проектах МЭК мощностью 8,8 МВт.

Разработанная гибридная ветродизельная установка с накопителем электроэнергии (НЭ) может стать базовой основой автономного энергоснабжения потребителей, прежде всего – районов Арктики.

### Полученные результаты и их анализ

Основаниями для технологической интеграции различных источников энергии в единый комплекс служат следующие факторы:

- 1) повышения энергобезопасности за счет диверсификации структуры энергоисточников;
- 2) снижения себестоимости электроснабжения за счет оптимизации загрузки наиболее эффективных источников энергии;
- 3) повышения надежности электроснабжения потребителей при возрастании количества допустимых альтернатив поставок;
- 4) снижение стоимости поставляемой энергии;
- 5) развитие конкурентных отношений за счет увеличения числа субъектов рынка.

Проведен анализ режимов работы многофункционального энергетического комплекса при переменной частоте вращения вала генераторов, определены режимы работы МЭК для выбранных и варьируемых параметров накопителя энергии при произвольном характере изменения нагрузки и генерации, разработаны алгоритмы управления комплексом и его отдельными составляющими, обеспечивающими заданные критерии качества при заданных возмущениях.

Разработаны две структуры опытного образца МЭК на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии и солнечными фотоэлементами, обеспечивающими совместное производство электроэнергии, тепла с помощью энергонагревателей и холода с помощью тепловых насосов.

Схема со звеном переменного тока. Все генераторы объединяются на шине переменного тока с относительно постоянной частотой. Должны быть подключены потребители, способные питаться от стабильного напряжения с относительно стабильной частотой. Инверторный модуль подключается к батарее с заданным диапазо-

ном напряжения звена постоянного тока. К звену постоянного тока можно подключить через DC/DC преобразователь солнечную батарею, которая обеспечивается накопителем.

Схема со звеном постоянного тока. В данной схеме к звену постоянного тока с нестабилизированным напряжением непосредственно подключается накопитель. Напряжение варьируется согласно паспортным данным батареи в зависимости от степени заряда. Поддерживается в основном номинальное напряжение рабочей точки порядка 1,1 кВ. Инвертор на 400 В может работать без гальванической развязки.

Проведены исследования режимов работы МЭЖ и разработаны алгоритмы управления САУ МЭЖ. Разработан вариант построения многофункционального энергетического комплекса на основе дизельной установки, работающей на сырой нефти, снижающей себестоимость выработки энергии в 4 раза по сравнению с дизельной установкой, работающей на арктическом дизельном топливе.

### **Высокоэффективные модульные малые и плавучие АЭС для Арктики [6]**

Государственная корпорация «Росатом» ведет разработки перспективных малых атомных электростанций малой мощности (МАЭС) и активизировала строительство первой плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАЭС), которая является одним из вариантов этого типа атомных станций (АС).

МАЭС в настоящее время не получили широкого распространения в мире. Ни одна ядерная держава не использует широко МАЭС в промышленных и других народно-хозяйственных целях. Интерес к МАЭС всегда проявляли и проявляют в основном военные и другие специальные ведомства, например космические агентства, специальные инженерные службы и т.д. Идею создания большой и разнообразной серии АСММ активнее всего продвигали в СССР и продвигают сегодня в России. В СССР первыми начали создавать малые атомные энергетические установки (АЭУ) для использования их в космических кораблях, а также на железнодорожных платформах, автомобильных тягачах и различных плавучих средствах (надводных и подводных).

Основной аргумент в пользу развития МАЭС в России сегодня – это необходимость решения проблем энергообеспечения северных и дальневосточных регионов страны. По экономическим оценкам, несмотря на то, что удельные капиталовложения различных проектов МАЭС в 5 и более раз превышают вложения в большие стационарные АЭС (1000 МВт), эти проекты являются перспективными. Развитие технологий малой атомной энергетики позволит занять эту энергетическую нишу, которая впоследствии может принести большие экономические выгоды, в том числе международные.

В настоящее время «Росатом» разработал крупную плавучую атомную станцию на базе двух реакторных установок КЛТ-40С тепловой мощностью 150 МВт каждая и двух паротурбинных установок с турбогенераторами электрической мощностью 35 МВт. Мощность ПАЭС составляет 70 МВт электрической и 300 МВт тепловой мощности. Реакторные и паротурбинные установки размещены побортно и работают автономно.

Плавучая атомная электростанция (ПАЭС) – российский проект по созданию мобильных плавучих атомных электростанций малой мощности, разрабатываемый Федеральным агентством по атомной энергии России, предприятием ОАО «Балтийский завод». Согласно проекту, плавучая атомная станция малой мощности (АСММ) состоит из гладкопалубного несамостоятельного судна с двумя реакторными установками КЛТ-40С ледокольного типа, разработанными ОАО «ОКБМ им. Африкантова». Длина судна – 144 м, ширина – 30 м. Водоизмещение – 21,5 тыс. т.

Плавучая станция может использоваться для получения электрической и тепловой энергии, а также для опреснения морской воды. В сутки она может выдать от 40 до 240 тыс. т пресной воды.

Установленная электрическая мощность каждого реактора – 35 МВт, тепловая мощность – 140 гигакалорий в час. Срок эксплуатации станции составит минимум 36 лет: три цикла по 12 лет, между которыми необходимо осуществлять перегрузку активных зон реакторных установок.

Перспективные проекты АЭС малой мощности

Название	Разработчик	Мощность			Обогащение топлива по U-235, %	Периодичность перегрузок топлива, лет	Срок эксплуатации	Тип реакторной установки
		Производство электроэнергии, МВт	Когенерация					
			Эл/эл, МВт	Тепло, Гкал/ч				
АБВ-6	ОКБМ	2x8,5	2x6	2x12	19,5	8	50	Водо-водяной реактор интегрального исполнения с естественной циркуляцией теплоносителя
СВБР-10	Гидропресс	2x12	2x6	2x25	18,7	12	60	Реактор на быстрых нейтронах со свинцово-висмуттовым теплоносителем
УниTERM	НИКИЭТ	2x6,6	2x3,5	2x17	19,5	25	50	Водо-водяной реактор интегрального исполнения с естественной циркуляцией теплоносителя

Планируемые места размещения: Певек, Чукотского АО, ЗАТО Вилючинск на Камчатке, строительство газовых месторождений на Таймыре. Возможный заказчик ОАО «Газпром». Возможна эксплуатация АСММ этого проекта в других странах с труднодоступными территориями – например, в Канаде, Индонезии и др.

Вспомогательный энергетический блок включает в себя четыре резервных дизель-генератора (РДГ) мощностью по 800 кВт каждый, а также четыре аварийных дизель-генератора (АДГ) мощностью по 200 кВт. Кроме этого, в конструкции ПЭБ предусмотрена вспомогательная котельная установка (ВКУ) производительностью по пару 16 т/ч. Для питания во время буксировки, а также во время переходных и аварийных режимов ядерной энергетической установки (ЯЭУ), ПАЭС снабжена источниками энергии на органическом топливе.

Согласно проекту ПЭБ имеет вполне достаточно резервных источников питания для обеспечения энергией аварийных режимов ядерной энергетической установки, а также собственных нужд при неработающей ЯЭУ. Решен вопрос надежности этих источников, особенно в экстремальных случаях (шторм, циклоны, землетрясения, пожары и т.д.).

**Иновационная технология строительства ПАЭС на основе использования ядерных энергетических установок утилизируемых атомных подводных лодок**

В СССР было построено самое большое количество атомных надводных кораблей и подводных лодок, на которых использовали АЭУ мощностью от 1 до 160 МВт.

Во второй половине 80-х годов XX в. начался интенсивный процесс снятия с эксплуатации и вывода из состава ВМФ России атомных подводных лодок (АПЛ). Это было связано как с истечением сроков службы, так и с выполнением Российской Федерацией международных обязательств по сокращению вооружений. Основные результаты работ по утилизации трех поколений АПЛ представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Утилизация АПЛ в России (апрель 2008 г.)**

Выведено АПЛ из состава ВМФ	198
Утилизировано АПЛ	164
АПЛ в ожидании утилизации	34

Значительная часть ядерных энергетических установок (ЯЭУ) выводимых из эксплуатации АПЛ 2-го и 3-го поколений не выработали на-

значенные ресурсные показатели и в основном находятся в хорошем состоянии.

В настоящее время в России разворачивается программа строительства плавучих атомных электростанций малой мощности. Энергоблоки плавучих АЭС планируется создавать на базе судовых реакторных установок типа КЛТ-40 (прототипом являлся реактор ОК-900), хорошо зарекомендовавших себя при эксплуатации на атомных судах. Так, например, ЯЭУ атомного ледокола «Арктика» (реактор ОК-900) успешно эксплуатировалась с 1975 по 2008 годы.

Также следует учитывать, что стоимость изготовления реакторов для плавучей АЭС составляет по разным оценкам от 40 до 60% общей стоимости станции. Таким образом, при строительстве плавучих АЭС представляется экономически целесообразным использовать готовые РО выводимых из эксплуатации АПЛ.

Для данных целей в полной мере подходят эксплуатируемые или находящиеся на этапах вывода из эксплуатации и временного хранения на плаву АПЛ 2-го и 3-го поколений (общее количество таких АПЛ составляет примерно 140 единиц [3]). ЯЭУ утилизируемых АПЛ, по мнению специалистов, далеки от выработки ресурсных показателей. Специфика эксплуатации АПЛ заключается в том, что доля режимов работы ЯЭУ на нагрузках, близких к максимальным, невелика. Кроме того, высокая надежность и живучесть ЯЭУ подтверждена как многолетним опытом эксплуатации, так и гибелью подводных лодок. Реакторы всех затонувших АПЛ были надежно заглушены, при этом ни разу не было зарегистрировано радиационного загрязнения акватории. Последним примером тому служит катастрофа АПЛ «Курск» (август 2000 года).

Отдельный вопрос – это возможность использования паротурбинной установки (ПТУ) утилизируемой АПЛ. Тепловая схема ПТУ АПЛ отличается от проектируемых на плавучей АЭС отсутствием термического деаэраатора питательной воды (установка которого не представляет затруднений) и большей частотой вращения главной турбины. Вопрос о варианте использования главной турбины может решаться двояко. Во-первых, уменьшение частоты вращения

главной турбины до 3000 оборотов в минуту несколько снизит ее мощность, но позволит ей работать совместно с турбогенератором, вырабатывающим ток частотой 50 Гц. Избыток пара при этом можно использовать для передачи на берег тепловой энергии через промежуточный теплообменник. Во-вторых, использование главной турбины во всем диапазоне частот вращения потребует применения статических преобразователей частоты для выдачи в сеть электроэнергии требуемого качества. Таким образом, оборудование ПТУ утилизируемых АПЛ также может быть использовано в составе энергетического модуля на плавучих АЭС.

Утилизируемые атомные подводные лодки 2-го и 3-го поколений имеют широкий диапазон мощностей реакторов от 70 до 190 МВт и главных турбин от 15 до 37 МВт. Это позволяет подобрать для использования на плавучих АЭС требуемые мощности главного энергетического оборудования.

Стоимость строительства плавучей АЭС под ключ приблизительно на 80% определяется стоимостью ЯЭУ и ПТУ. Использование ЯЭУ утилизируемых АПЛ позволит заметно уменьшить эту стоимость.

Масса реакторной установки утилизируемых АПЛ 2-го поколения составляет около 1200 т, а 3-го – около 1600 т. Это позволяет использовать реакторные и турбинные отсеки в качестве единого энергетического модуля, монтируемого на плавучей АЭС. В этом случае мы получим ранее построенную и оплаченную ЯЭУ в защитной оболочке, функцию которой выполняет прочный корпус АПЛ. Таким образом:

- инновационная технология использования ЯЭУ утилизируемых АПЛ позволит:
- значительно сократить затраты на строительство плавучих АЭС и время их строительства и окупаемости;
- снизить затраты на утилизацию АПЛ;
- значительно уменьшить количество радиоактивных отходов и затраты на обращение с ними;
- в полной мере использовать потенциал ЯЭУ АПЛ.

Для внедрения указанной технологии необходимо уже в ближайшее время развернуть комплекс НИОКР, позволяющий научно обосновать техническую возможность РО утилизируемых АПЛ для проектируемых плавучих АЭС.

### **Интеллектуальная интегрированная система сетевидной архитектуры одновременного производства электроэнергии, тепла и холода на базе высокоэффективных модульных малых и плавучих АЭС для Арктики**

Для повышения эффективности использования модульных МАЭС и ПАЭС предлагается создать интеллектуальную интегрированную систему сетевидной архитектуры одновременного производства электроэнергии, теплоты и холода [7].

Решаемые задачи: низкая эффективность значительной части энергогенерирующих установок для Арктики требует поиска выхода из создавшегося положения как в части создания высокоэффективных энергетических установок для комбинированной выработки тепловой и электрической энергий, так и за счет других возможностей энергосбережения при ограниченных возможностях использования привозного топлива.

Последнее время в мировой практике появился интерес к проблеме совместной выработки не только электроэнергии и теплоты, но и холода за счет использования сбросного тепла энергоустановок. Наибольшим спросом пользуется холод для кондиционирования крупных зданий и сооружений. Основное требование к холоду, используемому для кондиционирования, чтобы температура хладагента не превышала 10 °С. Значительно меньший масштаб потребителей требует температуры хладагента до -18 °С для замораживания продуктов питания и других целей. Основным конкурентом этого направления являются обычные холодильные камеры.

Основной целью является разработка технического предложения по эффективному методу получения холода за счет использования сбросного тепла от высокоэффективных МАЭС и ПАЭС, имея в виду, что эффективность совместного производства электроэнергии и теплоты уже доказана.

Холод для кондиционирования требуется в летний период, когда потребность в тепле резко падает из-за отключения отопительной нагрузки (сохраняется потребность в тепле около 20% для горячего водоснабжения). Сбросным теплом в МАЭС и ПАЭС в этот период является отвод тепла охлаждающей водой из конденсатора паровой турбины в градирню и отвод тепла с охлаждающей водой из промежуточных воздухоохладителей компрессоров МАЭС и ПАЭС. Поиск эффективных методов использования этого тепла для получения холода задача очень сложная и требует, как правило, использования дополнительной энергии.

Повышение эффективности одновременного производства электроэнергии, теплоты и холода на базе высокоэффективных модульных МАЭС и ПАЭС предлагается на базе концепции сетевидности, сетевидных систем и создания интеллектуальных интегрированных систем сетевидной архитектуры. Применение принципов сетевидности будет полезно для одновременного производства электроэнергии, теплоты и холода на базе высокоэффективных модульных МАЭС и ПАЭС, использующих информационные технологии.

Особенностью МАЭС и ПАЭС является конденсация паров воды из парогазовой смеси после турбины при давлении около 0,3 МПа с получением горячей воды для теплоснабжения с температурой около 100 °С. При снижении тепловой нагрузки в летний и весенне-осенний период часть этой воды является сбросной.

Однако в этот период появляется потребность в холоде. Генерация холода при наличии дешевого источника теплоты на уровне 100 °С существенно упрощает задачу его получения. Значительным преимуществом предлагаемой комплексной технологической схемы является то, что генерация холода может происходить непосредственно у потребителя за счет отбора горячей воды из существующей теплотрассы. Причем расход циркулирующей воды в теплотрассе для теплоснабжения и генерации холода никогда не превосходит зимнего максимума. Однако, как для улучшения экономических показателей ПГУ, так и повышения параметров получаемого конденсата, направляемого для получения теплоты в зимнее время и холода в

осеннее-весенний и летний периоды, требуется высокое парциальное давление паров воды в поступающем в камеру сгорания воздухе.

Основным источником холода в настоящее время являются холодильные машины с электрическим приводом и хладагентами (аммиак, фреон и др.). Для кондиционирования воздуха крупных потребителей используются абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины, обеспечивающие температуру охлаждаемого агента (вода) до 3-5 °С. Для регенерации раствора бромистого лития требуется подвод тепла на уровне 100 °С (пар, горячая вода).

В принципе сочетание МАЭС и ПАЭС с данного типа холодильными машинами вполне оправдано. В случае необходимости возможно получение более глубокого холода (0 °С, -18 °С) по технологии низкотемпературного холода с использованием как бромистолитиевых холодильных машин, так и машин с другими хладагентами.

Экспериментальные исследования по получению низкотемпературного холода выполнено в ИТ СО РАН.

### Перспективы применения

Технические характеристики создаваемой научно-технической продукции:

- разрабатываемые интеллектуальные интегрированные систем сетцентрической архитектуры одновременного производства электроэнергии, тепла и холода на базе высокоэффективных модульных МАЭС и ПАЭС должны обеспечивать повышение эффективности использования первичных и конечных энергоносителей на 15%;
- разрабатываемые технические предложения по созданию системы одновременной выработки электроэнергии, тепла и холода на базе высокоэффективных модульных МАЭС и ПАЭС должны обеспечить по сравнению с отдельным производством, теплоты и холода достижение следующих показателей:
  - 1) общую экономию топлива на производство одной и той же совокупности продукции не менее 15%;

- 2) снижение совокупных затрат не менее чем на 12%.

Перечисленные выше работы имеют прямое отношение к технической платформе «Интеллектуальная энергетическая система России».

*Ожидаемые результаты технологического процесса и оценка перспективы их коммерциализации.*

1. Будет рассмотрено несколько альтернативных схем получения холода за счет сбросного тепла от парогазовых установок с использованием различных хладагентов.

2. Будут разработаны альтернативные схемы комплексного производства электроэнергии, тепла и холода на базе различных схем ПГУ.

3. Будет разработана методика сравнительного технико-экономического анализа альтернативных комплексных технологий совместного производства электроэнергии, тепла и холода.

4. Будет выполнен комплекс теоретических и экспериментальных работ по технологии получения низкотемпературного холода и выданы рекомендации по выбору оптимального варианта.

5. Будет выполнен сравнительный технико-экономический анализ альтернативных технологий единовременного производства электроэнергии, тепла и холода на базе ПГУ и выбран оптимальный вариант.

6. Для оптимального варианта будут выполнены варианты расчетов по соотношению в потребностях электроэнергии, тепла и холода в различное время года и определены среднегодовые показатели.

7. Будет выполнен сравнительный анализ преимуществ генерации холода за счет сбросных тепловых источников по сравнению с традиционными и разработаны рекомендации для создания промышленных технологий.

Необходимо выполнить комплекс научно-исследовательских работ, связанных со схемами выдачи электрической и тепловой мощности МАЭС и ПАЭС с одновременным производством холода, а именно:

- формирование технико-экономического обоснования (ТЭО) применения МАЭС и ПАЭС различной мощности для конкретных условий применения в арктической зоне;

- разработку вспомогательных энергетических блоков включающих в себя резервные дизель-генераторы (РДГ) мощностью по 800 кВт каждый и аварийных дизель-генераторов (АДГ) мощностью по 200 кВт совместно с системой накопления энергии для повышения режимной надежности и управляемости;
- разработку технических предложений создания интеллектуальных интегрированных систем сетецентрической архитектуры одновременного производства электроэнергии, тепла и холода на базе высокоэффективных модульных малых и плавучих АЭС для Арктики;
- разработку схем выдачи электрической мощности МАЭС и ПАЭС;
- разработку схем выдачи тепловой мощности МАЭС и ПАЭС;
- разработку схем получения холода за счет высокопотенциального тепла МАЭС и ПАЭС;
- разработку алгоритмов управления ДГУ с накопителем энергии.

### Заключение

Многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии и солнечными фотоэлементами, обеспечивающими совместное производство электроэнергии и тепла с помощью электронагревателей и холода с помощью тепловых насосов, может стать базовой основой автономного энергоснабжения потребителей труднодоступных районов России для централизованного энергоснабжения, прежде всего – районов Арктики.

Интеллектуальная интегрированная система сетецентрической архитектуры одновременного производства электроэнергии, тепла и холода на базе высокоэффективных модульных малых и плавучих АЭС позволит существенно повысить экономичность, надежность и управляемость систем энергоснабжения для Арктики.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года (основные положения). Проект. URL: <http://www.ac.gov.ru>
2. Smith M., Giles K. *Russia and the Arctic: The Last Dash North. Advanced Research and Assessment Group. Russia Series 07/26. Defense Academy of the United Kingdom, 2007. P. 1.*
3. Ломакин М.И., Докукин А.В. Интеграция российских инновационных предприятий в мировую экономику на основе развития информационного обеспечения стандартизации // *Российское предпринимательство*. 2012. № 2.
3. *United Energy Flow / News. www.Gazeta.ru.*
4. Зайченко В.М., Чернявский А.А. *Автономные системы энергоснабжения*. М.: НЕДРА, 2015. 285 с.
5. Никифоров О. *Альтернативная энергетика в Арктике // Независимая газета*. – 19.05.2017.
6. *Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетике*. Т. 2 / под ред. А.А. Саркисова. М.: Академ-Принт, 2015. 387 с.
7. Душкин Д.Н., Фархадов М.П. *Сетецентрические технологии: эволюция, текущее положение и области дальнейших исследований / Институт проблем управления им. В.А Трапезникова РАН*. М.: 2015.

### REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda (osnovnyye polozheniya)*. Projekt. URL: <http://www.ac.gov.ru>
2. Smith M., Giles K. *Russia and the Arctic: The Last Dash North. Advanced Research and Assessment Group. Russia Series 07/26. Defense Academy of the United Kingdom, 2007. P. 1.*
3. Lomakin M.I., Dokukin A.V. *Integratsiya rossiyskikh innovatsionnykh predpriyatij v mirovuyu ekonomiku na osnove razvitiya informatsionnogo*

*obespecheniya standartizatsii//Rossiyskoye predprinimatel'stvo. 2012. № 2.*

3. *United Energy Flow / News. www.Gazeta.ru.*

4. *Zaychenko V.M., Chernyavskiy A.A. Avtonomnyye sistemy energosnabzheniya. M.: NEDRA, 2015. 285 s.*

5. *Nikiforov O. Al'ternativnaya energetika v Arktike // Nezavisimaya gazeta. – 19.05.2017.*

6. *Atomnyye stantsii maloy moshchnosti: novoye napravleniye razvitiya energetiki. T. 2 / pod red. A.A. Sarkisova. M.: Akadem-Print, 2015. 387 s.*

7. *Dushkin D.N., Farkhadov M.P. Setetsentricheskiye tekhnologii: evolyutsiya, tekushcheye polozheniye i oblasti dal'neyshikh issledovaniy / Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN. M.: 2015.*

Поступила в редакцию  
04.06.2018 г.