

Н. Н. Мельников, С. А. Гусак, В. А. Наумов

Реакторные установки для энергоснабжения арктических регионов России: оценка приоритетности атомных энергоисточников

В условиях конкурентоспособности атомных станций малой мощности (АСММ) и целесообразности их использования для энергоснабжения удаленных и труднодоступных регионов проявляется конкуренция среди атомных энергоисточников, которая обусловлена широким спектром предложений для решения задачи энергообеспечения различных потребителей в децентрализованной зоне энергетического комплекса российской Арктики. В статье предложен методический подход для экспертной оценки приоритетности реакторных установок малой мощности, которая основана на использовании балльной системы. Приоритетные типы реакторных установок определялись на основе оценки соответствия установок следующим критериям: уровень референтности реакторных установок и степень их готовности к реализации; длительность топливного цикла, которая в значительной степени определяет уровень автономности атомного энергоисточника; возможность создания модульно-блочной структуры АСММ; максимальный вес транспортируемого единичного оборудования реакторной установки; срок службы основного оборудования. В рамках предложенного методического подхода выполнено предварительное ранжирование реакторных установок по различным критериям, которое в количественном отношении позволяет определить относительное различие и приоритетность проектов атомных станций малой мощности для энергоснабжения арктических регионов России. С целью оценки чувствительности результатов ранжирования к параметрам балльной системы рассматривались пятибалльная и десятибалльная шкала при различной значимости (весовые коэффициенты) различных критериев. Приведены результаты ранжирования, позволившие выделить следующие типы реакторных установок в порядке их приоритетности: АБВ-6Э (АБВ-6М), "УниTERM" и СВБР-10 в энергетическом диапазоне до 20 МВт; РИТМ-200 (РИТМ-200М), КЛТ-40С и СВБР-100 в энергетическом диапазоне свыше 20 МВт.

Ключевые слова: атомные станции малой мощности, реакторные установки, энергоснабжение, арктические регионы России.

Введение

Проблема модернизации и развития энергетической инфраструктуры, решение которой рассматривается в качестве одной из приоритетных задач государственной политики Российской Федерации в Арктике, в наибольшей степени актуальна для децентрализованной зоны энергетических комплексов арктических регионов. Для решения проблемы энергообеспечения удаленных и труднодоступных регионов различными специалистами был выполнен многофакторный анализ энергетической инфраструктуры арктических территорий, который позволил определить области возможного использования атомных станций малой мощности (АСММ) в качестве энергоисточников для энергоснабжения потребителей в децентрализованной зоне энергетического комплекса российской Арктики [1–4]. В обобщенном виде энергетические нагрузки потенциальных потребителей, определяющих роль и место энергоисточников при решении проблемы энергообеспечения, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Перспективные энергетические нагрузки потребителей энергии Арктической зоны [1; 2; 4]
Table 1. Prospective power loads of energy consumers of the Arctic region

Потребитель энергии	Регион	Нагрузка	
		электрическая, МВт	тепловая, Гкал/ч
Месторождение ниобий-редкоземельных металлов "Томтор"	Якутия	до 36	7
Месторождение рудного золота "Кючус"		до 30	10
Месторождение медных руд "Песчанка"	Чукотский АО	более 200	82
Портовая инфраструктура п. Тикси	Якутия	12	нет данных
Инфраструктура арктической группировки Вооруженных сил РФ	Земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане	0,5–10	нет данных

Вопрос использования энергоисточников с реакторами малой мощности для различных целей был поставлен более полувека назад, когда в середине 1950-х гг. начались проектные проработки ядерных энергоустановок малой мощности, которые продолжались с различной интенсивностью все последующие

десятилетия. Проводившиеся в течение этого времени многочисленные технико-экономические исследования и разработки различных конструктивных разновидностей ядерных реакторов для малой энергетики показали, что реакторы малой мощности и атомные станции на их основе имеют значительный потенциал для освоения новых и перспективных для атомной энергетики сегментов рынка, каким является энергоснабжение отдаленных или изолированных регионов. Вместе с тем реакторные установки малой мощности не получили широкомасштабного применения в этом секторе энергопотребления. Более того, ни одна из разработанных реакторных установок малой мощности, предназначенных для энергообеспечения труднодоступных регионов, так и не была доведена до промышленного освоения.

Проблемы практической реализации перспективных проектов АСММ неоднократно рассматривались и обсуждались на заседаниях Научно-технических советов Госкорпорации "Росатом" и ОАО "Концерн Росэнергоатом", на межотраслевых научно-технических конференциях. Результаты этих обсуждений позволили сформулировать следующие основные факторы, сдерживающие коммерческое внедрение ядерных энергоисточников на локальном и местном уровнях [5]:

- отсутствие прототипных (референтных) энергоблоков, т. е. нет готового продукта;
- отсутствие прямых предложений инвесторов, которые могли бы быть приняты для немедленной реализации;
- при безусловном выполнении требований безопасности факторами для определения приоритета при выборе энергоисточника являются: подготовленность к реализации, сроки реализации, готовность промышленности и эксплуатационной инфраструктуры, экономические и коммерческие факторы.

На базе проектных разработок, исследований рынка, определения областей применения, а также исследований по тематическим программам МАГАТЭ и международных проектов, включая INPRO (Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам) различными специалистами с разной степенью детализации сформировался комплекс требований и целевых характеристик АСММ [1; 3; 5–8]. Комплексный характер задачи внедрения АСММ предопределяется необходимостью анализа многих факторов, связанных со строительством и эксплуатацией таких энергоисточников для того или иного конкретного потребителя энергии. Несомненно, определяющим фактором является энергетическая потребность объектов, которая обуславливает целесообразность и объем использования АСММ для их энергообеспечения. С учетом этого фактора кратко остановимся на российских разработках реакторных установок малой мощности, которые в настоящее время рассматриваются в качестве перспективных для энергоснабжения удаленных и изолированных регионов.

Наиболее полная аналитическая информация о таких установках в обобщенном виде приведена в работе руководителя рабочей группы Росатома по отбору предложений для реализации АСММ Е. О. Адамова [6]. При рассмотрении этой информации выделим проекты АСММ в плавучем, транспортабельном или стационарном исполнении, предназначенные для эксплуатации в конденсационном режиме и/или в режиме когенерации (комбинированное производство электрической и тепловой энергии), и разработки которых в настоящее время достигли как минимум стадии технического предложения (табл. 2).

Данные, приведенные в табл. 2, позволяют утверждать, что для покрытия перспективных нагрузок потенциальных потребителей (см. табл. 1) могут быть созданы АСММ в широком энергетическом диапазоне. Оценка сравнительной эффективности использования АСММ в труднодоступных и удаленных регионах, выполненная специалистами Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, позволила определить граничные значения себестоимости производства электроэнергии для достижения конкурентоспособности атомных энергоисточников [2]:

- как автономный энергоисточник – 14–17 руб./кВт·ч;
- в локальной энергосистеме – 4–6 руб./кВт·ч.

С учетом этих значений данные табл. 2 позволяют сделать предварительный вывод о конкурентоспособности АСММ в сравнении с другими источниками энергии. Следует отметить, что современное состояние разработок АСММ и перспективы их практической реализации обуславливают ориентировочный характер выводов о влиянии экономического фактора на выбор приоритетных АСММ для энергоснабжения конкретных потребителей энергии. В качестве примера, иллюстрирующего условный характер этого фактора, можно отметить динамику изменения величины капитальных затрат (и как следствие, себестоимости энергетической продукции) на сооружение АСММ с реакторными установками КЛТ-40С и СВБР-100. Так, если в 2002 г. стоимость строительства плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) "Академик Ломоносов" с реакторами КЛТ-40С оценивалась в 3 млрд руб., то в 2010 г. она составляла 14,1 млрд руб. [9], а в 2015 г. – 37,4 млрд руб. [6]. Увеличение стоимости строительства отмечается также для опытно-промышленного атомного энергоблока с реактором СВБР-100 в Димитровграде (Ульяновская область): сметная стоимость этого проекта выросла с первоначальной величины 15 млрд руб. до 36 млрд руб.¹

¹ Ростехнадзор разрешил разместить в Поволжье атомный блок СВБР-100. URL: <http://ria.ru/atomtec/20150220/1048789168.html>.

Таблица 2. Российские проекты АСММ [6; 7]
Table 2. Russian SNPP projects

Название	Электрическая мощность, МВт	Срок службы, лет	Топливный цикл, мес.	LCOE*, руб./кВт·ч
Строящиеся АСММ				
ПАТЭС "Академик Ломоносов" (КЛТ-40С)	70**	40	36	9,72
Проекты АСММ электрической мощностью 1–20 МВт				
Витязь	1	30	84	12
Ангстрем	6	30	72	0,15 (1991 г.)
УниTERM	6,6	60	180	12,9
АБВ-6Э	9	40 (с продлением до 60)	144	10,6
СВБР-10	24 ²⁾	60	204	0,048 долл./кВт·ч (2005 г.)
Проекты АСММ электрической мощностью 20–100 МВт				
ВРК-М/ВРК-100	20/45/100	80	30	1,5
РИТМ-200	50	60	120	4,3
НИКА	100	60	36	3,3
СВБР-100	100	60	96	0,042 долл./кВт·ч*** (2009 г.)

Примечание. * LCOE – нормированная на срок жизни станции стоимость единицы электроэнергии (включая все возможные затраты, доходы и инвестиции, в том числе с учетом фактора дисконтирования); ** два энергоблока; *** для четырехблочной АСММ.

Несомненно, при наличии широкого спектра предложений по проектам реакторных установок экономический фактор является одним из определяющих критериев в оценке конкурентоспособности АСММ. Вместе с тем, учитывая отмеченную ранее неопределенность в экономических показателях атомных энергоисточников, в настоящей работе указанный фактор не рассматривается.

В статье [10] на основе анализа различных сценарных условий экономического развития арктических регионов были рассмотрены некоторые аспекты проблемы выбора реакторных установок для энергоснабжения удаленных и труднодоступных регионов на примере нескольких месторождений полезных ископаемых. Настоящая статья является развитием упомянутой работы и посвящена экспертной оценке приоритетности атомных энергоисточников, которая базируется на использовании балльной системы.

Материалы и методы

Определение приоритетных для внедрения типов реакторных установок малой мощности выполнялось на основе экспертной оценки соответствия различных реакторных установок следующим критериям:

- "референтность" – учитывает уровень референтности реакторных установок и степень их готовности к реализации;
- "топливный цикл" – учитывает такой фактор как длительность топливного цикла, которая в значительной степени определяет уровень автономности атомного энергоисточника;
- "модульность" – оценивается возможность создания модульно-блочной структуры АСММ;
- "вес" – учитывает максимальный вес транспортируемого единичного оборудования реакторной установки;
- "срок службы" – определяет срок службы основного оборудования.

Отметим, что в связи с отсутствием достаточной доступной информации, которая позволяла бы выполнить ориентировочную оценку конкурентоспособности, в последующем анализе различных критериев не рассматривается реакторная установка "Витязь".

Ранее отмечалось, что уровень референтности и степень готовности реакторных установок к практической реализации является одним из важных факторов, которые сдерживают коммерческое внедрение атомных энергоисточников на локальном и местном уровнях. В контексте данной проблемы рассмотрим данные, приведенные в работе Е. О. Адамова [6], который на основе анализа различных факторов, оказывающих влияние на готовность реакторных установок к практической реализации, выделяет три группы АСММ (табл. 3).

Таблица 3. Ранжирование проектов АСММ по степени готовности к реализации [6]
Table 3. SNPP project ranking according to the degree of readiness to implementation

Группа	Степень готовности АСММ	АСММ
1	Имеющие референтность и работающие прототипы, возможность реализации в пределах 6 лет. Позволяют провести последующую отработку логистики создания и обслуживания, отработку применяемых технологий для последующих поколений установок	КЛТ-40С (ПАТЭС "Академик Ломоносов")
2	Имеющие задел в проектной и производственной части, возможность реализации в пределах 6–10 лет. Требуемые или не требующие дополнительных НИОКР, в том числе по топливу	АБВ-6Э; Ангстрем; УниTERM; РИТМ-200; ВРК-М; НИКА; ВРК-100
3	Имеющие потенциальные преимущества, требующие дальнейших проработок и НИОКР в развитие предложений	СВБР-10

Говоря о стационарном варианте АСММ с реакторными установками мощностью свыше 20 МВт, следует отметить, что специалистами "ОКБМ Африкантов" разработана реакторная установка РИТМ-200М (электрическая мощность 36 МВт, тепловая мощность 150 МВт), которая является модификацией установки РИТМ-200. В настоящее время ведутся работы, направленные на адаптацию РИТМ-200М под требования заказчика с учетом специфики использования в составе АСММ [8].

В ранжировании энергоисточников энергетического диапазона свыше 20 МВт, приведенном в табл. 3, отсутствует реакторная установка СВБР-100. Вместе с тем современное состояние этого проекта позволяет рассматривать АСММ с реакторами данного типа в качестве перспективного энергоисточника для энергообеспечения объектов в удаленных районах Арктической зоны РФ. В настоящее время на базе свинцово-висмутовой технологии, освоенной применительно к атомным подводным лодкам (АПЛ) проекта 705, ведется разработка технического проекта атомной станции с реактором СВБР-100 в Ульяновской области (г. Димитровград). В соответствии с планами реализации проекта в 2019 г. предполагается физический и энергетический пуск опытно-промышленного энергоблока, а с 2024–2025 гг. планируется начать серийный выпуск и поставку комплектного оборудования².

Если говорить о реакторных установках энергетического диапазона до 20 МВт, то, по мнению многих специалистов, наибольшей степенью референтности технических решений и готовности к реализации характеризуется проект энергоблока АБВ-6Э в вариантах плавучего и стационарного исполнения, который разработан специалистами "ОКБМ Африкантов" на основе использования реакторной установки АБВ-6М. В свое время работы по АСММ с реакторами АБВ продвинулись достаточно далеко. В начале 1990-х годов по заказу Министерства обороны СССР был выполнен технический проект ПАТЭС "Волнолом-3" с реактором АБВ-6 для использования на полигоне на Новой Земле. Наряду с разработкой проекта плавучей станции были проведены технико-экономические исследования по стационарным двухблочным станциям с реакторной установкой АБВ-6 в наземном и подземном исполнении применительно к различным площадкам. Дальнейшее развитие этот проект получил в начале 2000-х годов, когда были разработаны ТЭИ строительства ПАТЭС с установкой АБВ-6М для Крайнего Севера (поселки Тикси, Усть-Камчатск) и АТЭС для Казахстана [5].

Наличие реакторов-прототипов также определяет референтность других реакторных установок, которая позволяет провести отработку инновационных технологий для последующих поколений реакторов. По мнению авторов настоящей работы, меньшей степенью референтности характеризуются установки, не имеющие действовавших реакторов-прототипов, а именно [6]:

– реакторная установка "НИКА" – разработана на базе проекта первой отечественной интегральной транспортной установки МБУ-40 тепловой мощностью 200 МВт, разработанного НИКИЭТ в начале 1970-х гг.;

– реакторная установка "УниTERM", проект которой разработан на основе опыта проектирования, изготовления и эксплуатации транспортных ядерных энергетических установок водо-водяного типа для объектов Военно-морского флота и апробированных практикой технических решений.

Использование инновационных решений в проектах перспективных АСММ, которые являются развитием или отличаются от прототипов, обуславливает определенную задержку в коммерциализации таких АСММ, связанную с необходимостью подтверждения соответствия требованиям безопасности для реактора-прототипа. Так, например, проекты реакторных установок типа СВБР разрабатываются на базе

² Проект СВБР-100. URL: <http://www.akmeengineering.com/svbr.html>.

технических решений транспортных реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем, вместе с тем эти реакторные установки не имеют прототипа в виде атомной станции с реактором данного типа и обладают рядом принципиальных отличий от прототипа реакторов АПЛ проекта 705. В частности, интегральная (моноблочная) компоновка первого контура СВБР отличается от петлевой (блочной) компоновки реакторной установки-прототипа. Это обуславливает необходимость экспериментального подтверждения надежности и эффективности гидравлических процессов при эксплуатации головного энергоблока СВБР. Другим важным отличием реакторов СВБР от транспортных реакторов является использование топлива в виде диоксида урана. Поэтому можно предположить, что для этого вида топлива потребуется экспериментальное доказательство работоспособности твэлов при заявляемой продолжительности топливного цикла (до 8 лет для СВБР-100 и до 20 лет для СВБР-10 [11]) в процессе эксплуатации головного опытно-промышленного энергоблока.

Можно полагать, что с точки зрения обоснования работоспособности и надежности твэлов перспективные водо-водяные реакторы характеризуются более высокой степенью референтности по сравнению с реакторами типа СВБР. Данное утверждение основано на многолетнем опыте проектирования и эксплуатации атомных ледоколов при выработке высокого проектного энергоресурса активных зон реакторов и перспективных разработках материалов и твэлов для транспортных реакторов и атомных станций малой мощности, которые позволяют значительно увеличить ресурсные характеристики и сроки службы активных зон [12].

Следующий рассматриваемый критерий – "топливный цикл" – в значительной мере определяется длительностью топливного цикла реактора, а также необходимостью резервирования мощности АСММ для энергоснабжения в период остановок и перегрузки топлива. С этой точки зрения среди энергоисточников в энергетическом диапазоне до 20 МВт наиболее предпочтительно использование АСММ с реакторными установками "УниTERM", АБВ-6Э и СВБР-10, длительность топливной кампании которых в два и более раза превышает данный показатель для других установок указанного мощностного ряда. Среди реакторных установок мощностью свыше 20 МВт фактор продолжительности топливного цикла обуславливает преимущество АСММ с реакторами РИТМ-200 и СВБР-100.

С помощью критерия "модульность" оценивается возможность создания модульно-блочной структуры АСММ путем использования стандартизированных реакторных модулей заводского изготовления. Очевидно, что данному критерию в наибольшей степени отвечают проекты АСММ на основе использования интегральной компоновки оборудования первого контура. В этом отношении несомненным преимуществом по сравнению с реакторными установками типа КЛТ-40С и ВРК-М/ВРК-100 (установки с петлевой компоновкой первого контура) обладают практически все другие установки, которые позволяют реализовать модульно-блочное исполнение АСММ. Отметим, что хотя реакторная установка "Ангстрем" также относится к установкам с петлевой компоновкой первого контура, по заявлению разработчиков, АСММ с такой установкой представляет собой блочно-транспортную АТЭЦ с полной заводской готовностью оборудования и транспортных модулей (блоков), которые могут доставляться автомобильным, железнодорожным и водным транспортом [6].

Модульно-блочное исполнение АСММ способствует уменьшению объема сложных строительно-монтажных работ. Вместе с тем указанное преимущество реакторных установок с интегральной компоновкой обуславливает рассмотрение такой конкурентной предпосылки как минимизация логистических проблем, связанных с ограничением массогабаритных характеристик модулей (блоков) АСММ с учетом возможности транспортировки на базе существующей инфраструктуры Арктического региона. В оценках конкурентоспособности реакторных установок их соответствие данному требованию определяется с помощью критерия "вес", который учитывает такой параметр как максимальный вес единичного оборудования (транспортируемого модуля), доставляемого на площадку АСММ. Ориентировочные значения этого параметра для рассматриваемых установок приведены в табл. 4.

Таблица 4. Максимальный вес единичного транспортируемого оборудования³ [6; 11]
Table 4. The maximum weight of a single transported equipment

Реакторная установка	Оборудование	Вес, т
Реакторные установки электрической мощностью до 20 МВт		
Ангстрем	транспортный блок	до 200
УниTERM	транспортный модуль	180
АБВ-6Э (АБВ-6М)	парогенерирующий блок	200
СВБР-10	транспортный реакторный блок	310 (в полной комплектации)

³ Блочно-транспортная АТЭЦ "Ангстрем". URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/ru/projects/angstrom.php>; Реакторные установки КЛТ-40С для атомных станций малой мощности. URL: http://www.okbm.nnov.ru/images/pdf/klt-40s_extended_ru_web.pdf; Advances in small modular reactor technology developments. URL: https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/IAEA_SMR_Booklet_2014.pdf; Status of small and medium sized reactor designs. URL: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Technology/files/SMR-booklet.pdf>.

Реакторные установки электрической мощностью свыше 20 МВт		
КЛТ-40С	корпус реактора	46
ВРК-М/ВРК-100	корпус реактора	60/90
РИТМ-200 (РИТМ-200М)	парогенерирующий блок	150–200
НИКА	корпус реактора	180
СВБР-100	транспортируемый моноблок	270 (без активной зоны и теплоносителя)

Ранее был рассмотрен фактор, связанный с энергетическими потребностями потенциальных потребителей, который определяет соответствие технических и эксплуатационных параметров энергоисточника региональным условиям размещения АСММ. Дополнительно к этому фактору в оценке приоритетности реакторных установок использован критерий "срок службы", который определяет срок службы основного оборудования АСММ. Следует отметить некоторую условность этого критерия, которая обусловлена, в частности, тем, что для предприятий, связанных, например с добычей полезных ископаемых, возможен ограниченный период потребности в энергоисточнике из-за исчерпания месторождения, изменения ценовой конъюнктуры или объемов рыночной потребности в продукции. Вместе с тем некоторые специалисты рассматривают данный критерий в качестве одного из требований при решении задачи энергообеспечения удаленных районов и энергоснабжения горнопромышленных предприятий на основе использования атомных энергоисточников, срок службы основного оборудования которых должен составлять не менее 50 лет [3].

Несомненно, рассмотренные факторы не исчерпывают весь широкий спектр требований к атомным энергоисточникам, возможность анализа которых ограничена по причине отсутствия необходимых и достаточных данных в доступных источниках информации. Однако эти факторы позволяют в первом приближении выполнить ранжирование установок на основе экспертной оценки их соответствия различным критериям с использованием балльной системы, которая в количественном отношении позволяет определить относительные различия проектов АСММ.

При выполнении экспертной оценки предполагалось, что такие критерии как "референтность" и "Топливный цикл" имеют более высокое значение по сравнению с другими факторами при выборе приоритетных типов реакторных установок. В базовом варианте экспертной оценки рассматриваемым критериям приданы следующие веса, определяющие относительную значимость различных факторов:

- "референтность" – 40 %;
- "топливный цикл" – 30 %;
- "модульность" – 15 %;
- "вес" – 10 %;
- "срок службы" – 5 %.

Параметры балльной системы от 2 до 5, принятые в базовом варианте оценки, приведены в табл. 5. Кратко комментируя данные табл. 5, отметим, что для оценки по критерию "референтность" в группе 2 реакторных установок по уровню готовности к реализации (табл. 3) выделена подгруппа 2.1 для установок, которые характеризуются наиболее высокой степенью готовности, обусловленную наличием конструкторской документации, производственной и эксплуатационной инфраструктуры, а также референтностью технических решений. По мнению авторов, к таким реакторным установкам относятся АБВ-6М и РИТМ-200. Другие установки из второй группы табл. 3 отнесены к подгруппе 2.2. С учетом отмеченных ранее факторов, связанных с обоснованием инновационных решений, к этой же подгруппе отнесена установка СВБР-100.

Таблица 5. Балльная система оценки приоритетности реакторных установок (базовый вариант)
Table 5. The point system of priority assessment of the reactor units (basic version)

Критерий	Баллы			
	5	4	3	2
Референтность	группы таблицы 3			
	1	2.1	2.2	3
Топливный цикл	10 лет и более	7–9 лет	3–6 лет	Менее 3 лет
Модульность	интегральная компоновка	петлевая компоновка при наличии блочно-транспортабельной структуры АСММ	–	петлевая компоновка
Вес	до 50 т	50–100 т	100–200 т	более 200 т
Срок службы	более 50 лет	40–50 лет	30–40 лет	30 лет и менее

Результаты и обсуждение

На основе рассмотренного методического подхода выполнена ориентировочная оценка приоритетности реакторных установок. Результаты такой оценки для базового варианта приведены в табл. 6. Для большей наглядности в этой таблице приведены данные о баллах для различных установок в соответствии с табл. 5 и результаты оценки с учетом принятой значимости (весовых коэффициентов) каждого из критериев.

Таблица 6. Ранжирование реакторных установок в баллах (базовый вариант)
Table 6. Ranking of reactor units in points (basic version)

Реакторная установка	Критерий (вес, %)					Всего
	Референтность (40)	Топливный цикл (30)	Модульность (15)	Вес (10)	Срок службы (5)	
Реакторные установки электрической мощностью до 20 МВт						
Ангстрем	3 (1,2*)	3 (0,9)	4 (0,6)	3 (0,3)	2 (0,1)	15 (3,1)
УниTERM	3 (1,2)	5 (1,5)	5 (0,75)	3 (0,3)	5 (0,25)	21 (4,0)
АБВ-6Э (АБВ-6М)	4 (1,6)	5 (1,5)	5 (0,75)	3 (0,3)	4 (0,2)	21 (4,35)
СВБР-10	2 (0,8)	5 (1,5)	5 (0,75)	2 (0,2)	5 (0,25)	19 (3,5)
Реакторные установки электрической мощностью свыше 20 МВт						
КЛТ-40С	5 (2,0)	3 (0,9)	2 (0,3)	5 (0,5)	3 (0,15)	18 (3,85)
ВРК-М/ВРК-100	3 (1,2)	2 (0,6)	2 (0,3)	4 (0,4)	5 (0,25)	16 (2,75)
РИТМ-200 (РИТМ-200М)	4 (1,6)	5 (1,5)	5 (0,75)	3 (0,3)	5 (0,25)	22 (4,3)
НИКА	3 (1,2)	3 (0,9)	5 (0,75)	3 (0,3)	5 (0,25)	19 (3,3)
СВБР-100	3 (1,2)	4 (1,2)	5 (0,75)	2 (0,2)	5 (0,25)	19 (3,6)

Примечание. * в скобках указаны значения баллов с учетом весовых коэффициентов.

С целью оценки чувствительности результатов ранжирования к параметрам принятой балльной системы дополнительно были рассмотрены два варианта:

– вариант 2 – предусматривает повышение значимости критерия "референтность" с весом 50 % при одинаковой значимости критериев "топливный цикл" и "модульность" (по 20 %) и равнозначности критериев "вес" и "срок службы" (по 5 %);

– вариант 3 – при сохранении относительной значимости (весов) критериев для базового варианта повышена степень дифференцированности в оценке соответствия критериям на основе следующей градации баллов: 10 (5 в базовом варианте оценки – см. табл. 5), 8 (4), 5 (3) и 2 (2).

Выполненная оценка позволила сделать вывод об устойчивости результатов ранжирования в рамках принятых параметров балльной системы, на основе которых можно выделить следующие типы реакторных установок в порядке их приоритетности:

– в энергетическом диапазоне до 20 МВт

АБВ-6Э (АБВ-6М);

"УниTERM";

СВБР-10;

– в энергетическом диапазоне свыше 20 МВт

РИТМ-200 (РИТМ-200М);

КЛТ-40С;

СВБР-100.

Заключение

В условиях конкурентоспособности АСММ и целесообразности их использования для энергоснабжения удаленных и труднодоступных регионов проявляется конкуренция среди атомных энергоисточников, обусловленная широким спектром предложений для решения задачи энергообеспечения различных потребителей в децентрализованной зоне энергетического комплекса российской Арктики.

В настоящей работе выполнено ранжирование реакторных установок на основе экспертной оценки их соответствия различным критериям с использованием балльной системы, которая в количественном отношении отражает относительное различие и приоритетность проектов АСММ.

Говоря о результатах оценки ограниченного числа критериев, необходимо отметить, что выполненное ранжирование реакторных установок в значительной степени носит предварительный характер. Несомненно, наиболее корректная оценка при выборе того или иного типа реакторной установки должна базироваться на многопрофильном анализе разнообразных факторов, которые в совокупности определяют наиболее эффективное использование АСММ для энергоснабжения конкретных потребителей энергии. В оценке

широкого спектра различных критериев, в частности, можно выделить анализ следующих факторов, которые определяют целесообразность, эффективность и инженерно-техническую возможность использования АСММ для энергообеспечения конкретных потребителей:

- анализ вариантов энергообеспечения потенциальных потребителей как с точки зрения конкурентоспособности АСММ различного типа, так и в сравнении атомных энергоисточников с альтернативными источниками энергии;
- оценка пригодности площадок для размещения атомных энергоисточников;
- анализ состояния энергетической и транспортной инфраструктуры и ее развития для обеспечения строительства АСММ.

Библиографический список

1. Дмитриев В. В. Требования к энергогенерирующим источникам для обеспечения объектов на удаленных арктических территориях. URL: www.innov-rosatom.ru/files/download/file457.html.
2. Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Ижбулдин А. К. Приоритеты развития локальной энергетики арктической зоны на востоке РФ. URL: <http://sei.irk.ru/energy21/papers/Иванова.pdf>.
3. Крушельницкий В. Н. Области применения реакторных установок малой мощности // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: Т. 2 / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. М. : Академ-Принт, 2015. С. 50–58.
4. Санеев Б. Г., Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Франк М. И. Роль атомных станций малой мощности в зонах децентрализованного энергоснабжения на Востоке России // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. М. : Наука, 2011. С. 88–100.
5. Петрунин В. В., Гуреева Л. В., Фадеев Ю. П., Шмелев И. В., Лепехин А. Н., Удалищев С. В. Перспективы развития атомных станций с реакторами малой и средней мощности // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: Т. 2 / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. М. : Академ-Принт, 2015. С. 36–49.
6. Адамов Е. О. Состояние разработок АСММ в мире и России, приоритеты и перспективы их создания. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf>.
7. Кузнецов В. В. Обзор существующих и перспективных атомных станций малой мощности в Российской Федерации и за рубежом // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. М. : Наука, 2011. С. 159–178.
8. Петрунин В. В., Фадеев Ю. П., Гуреева Л. В., Скороходов С. Е. Проекты атомных станций малой и средней мощности, направления их технико-экономической оптимизации // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. М. : Наука, 2011. С. 182–186.
9. Фролов А. Плавающая АЭС: история и экспортные перспективы проекта. URL: www.ceness-russia.org/data/page_art/p36_1.pdf.
10. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А., Гусак С. А. Реакторные установки для энергоснабжения удаленных и труднодоступных регионов: проблема выбора // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 2. С. 198–208.
11. Климов Н. Н. Свинцово-висмутковые быстрые реакторы для атомных станций малой и средней мощности. URL: <http://www.slideshare.net/myatom/klimov-gidropress-svbr>.
12. Кулаков Г. В., Ватулин А. В., Ершов С. А., Косауров А. А., Коновалов Ю. В., Морозов А. В., Сорокин В. И., Федотов В. В. Опыт и перспективы разработки материалов и твэлов для транспортных реакторов и атомных станций малой мощности // Атомная энергия. 2015. Т. 119, вып. 5. С. 243–249.

References

1. Dmitriev V. V. Trebovaniya k energogeneriruyuschim istochnikam dlya obespecheniya ob'ektov na udalennyh arkticheskikh territoriyah [Requirements for power-generating sources to ensure the objects in remote Arctic territories]. URL: www.innov-rosatom.ru/files/download/file457.html.
2. Ivanova I. Yu., Tuguzova T. F., Izhbuldin A. K. Prioritety razvitiya lokalnoy energetiki arkticheskoy zony na vostoке RF [Development priorities of local energy in the East of RF]. URL: <http://sei.irk.ru/energy21/papers/Ivanova.pdf>.
3. Krushelnitskiy V. N. Oblasti primeneniya reaktornyh ustanovok maloy moschnosti [Application fields of small power reactor units] // Atomnye stantsii maloy moschnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki: T. 2 / pod red. akad. RAN A. A. Sarkisova. M. : Akadem-Print, 2015. P. 50–58.
4. Saneev B. G., Ivanova I. Yu., Tuguzova T. F., Frank M. I. Rol atomnyh stantsiy maloy moschnosti v zonah detsentralizovannogo energosnabzheniya na Vostoке Rossii [Role of small nuclear power plants in areas of decentralized power supply in Russia's East] // Atomnye stantsii maloy moschnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki / pod red. akad. RAN A. A. Sarkisova. M. : Nauka, 2011. P. 88–100.

5. Petrunin V. V., Gureeva L. V., Fadeev Yu. P., Shmelev I. V., Lepehin A. N., Udalishev S. V. Perspektivy razvitiya atomnykh stantsiy s reaktorami maloy i sredney moschnosti [Prospects for development of nuclear power plants with small and medium power reactors] // Atomnye stantsii maloy moschnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki: T. 2 / pod red. akad. RAN A. A. Sarkisova. M. : Akadem-Print, 2015. P. 36–49.

6. Adamov E. O. Sostoyanie razrabotok ASMM v mire i Rossii, priority i perspektivy ih sozdaniya [Development status of SNPP in the world and Russia, priorities and prospects of their creating]. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf>.

7. Kuznetsov V. V. Obzor suschestvuyuschih i perspektivnykh atomnykh stantsiy maloy moschnosti v Rossiyskoy Federatsii i za rubezhom [Review of existing and advanced small nuclear power plants in the Russian Federation and abroad] // Atomnye stantsii maloy moschnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki / pod red. akad. RAN A. A. Sarkisova. M. : Nauka, 2011. P. 159–178.

8. Petrunin V. V., Fadeev Yu. P., Gureeva L. V., Skorohodov S. E. Proekty atomnykh stantsiy maloy i sredney moschnosti, napravleniya ih tehniko-ekonomicheskoy optimizatsii [Projects of small and medium power nuclear power plants, trends of their technical and economic optimization] // Atomnye stantsii maloy moschnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki / pod red. akad. RAN A. A. Sarkisova. M. : Nauka, 2011. P. 182–186.

9. Frolov A. Plavuchaya AES: istoriya i eksportnye perspektivy proekta [Floating NPP: history and export prospects of the project]. URL: www.ceness-russia.org/data/page_art/p36_1.pdf.

10. Mel'nikov N. N., Konuhin V. P., Naumov V. A., Gusak S. A. Reaktornye ustanovki dlya energosnabzheniya udalennykh i trudnodostupnykh regionov: problema vybora [Reactor units for power supply of remote and inaccessible regions: selection issue] // Vestnik MGTU. 2015. V. 18, N 2. P. 198–208.

11. Klimov N. N. Svintsovo-vismutovye bystrye reaktory dlya atomnykh stantsiy maloy i sredney moschnosti [Lead-bismuth fast reactors for small and medium power nuclear power plants]. URL: <http://www.slideshare.net/myatom/klimov-gidropress-svbr>.

12. Kulakov G. V., Vatulin A. V., Ershov S. A., Kosaurov A. A., Konovalov Yu. V., Morozov A. V., Sorokin V. I., Fedotov V. V. Opyt i perspektivy razrabotki materialov i tvelov dlya transportnykh reaktorov i atomnykh stantsiy maloy moschnosti [Experience and perspectives on development of materials and fuel elements for transport reactors and low power nuclear power plants] // Atomnaya energiya. 2015. V. 119, vyp. 5. P. 243–249.

Сведения об авторах

Мельников Николай Николаевич – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, д-р техн. наук, профессор, академик, науч. руководитель института; e-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Mel'nikov N. N. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Professor, Academician, Scientific Director; e-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Гусак Сергей Андреевич – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук, доцент, зав. лабораторией; e-mail: gusnat52@mail.ru

Gusak S. A. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Head of Laboratory; e-mail: gusnat52@mail.ru

Наумов Вадим Алексеевич – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, канд. физ.-мат. наук, доцент, вед. науч. сотрудник; e-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru

Naumov V. A. – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Cand. of Phys.-Math. Sci., Associate Professor, Leading Researcher; e-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru

N. N. Mel'nikov, S. A. Gusak, V. A. Naumov

Reactor units for power supply to the Russian Arctic regions: Priority assessment of nuclear energy sources

Under conditions of competitiveness of small nuclear power plants (SNPP) and feasibility of their use to supply power to remote and inaccessible regions the competition occurs between nuclear energy sources, which is caused by a wide range of proposals for solving the problem of power supply to different consumers in the decentralized area of the Russian Arctic power complex. The paper suggests a methodological approach for expert assessment of the priority of small power reactor units based on the application of the point system. The priority types of the reactor units have been determined based on evaluation of the unit's conformity to the following criteria: the level of referentiality and readiness degree of reactor units to implementation; duration of the fuel cycle, which largely determines an autonomy level of the nuclear energy source; the possibility of creating a modular block structure of SNPP; the maximum weight of a transported single equipment for the reactor unit; service life of the main equipment. Within the proposed methodological approach the authors have performed a preliminary ranking of the reactor units according to various criteria, which allows quantitatively determining relative difference and priority of the small nuclear power plants projects aimed at energy supply to the Russian Arctic. To assess the sensitivity of the ranking results to the parameters of the point system the authors have observed the five-point and ten-point scales under variations of importance (weights) of different criteria. The paper presents the results of preliminary ranking, which have allowed distinguishing the following types of the reactor units in order of their priority: ABV-6E (ABV-6M), "Uniterm" and SVBR-10 in the energy range up to 20 MW; RITM-200 (RITM-200M), KLT-40S and SVBR-100 in the energy range above 20 MW.

Key words: small nuclear power plants, reactor units, power supply, Russian Arctic regions.