

DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-4-14
УДК 338.45:621.039:332.1

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АТОМНЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ МЕГАВАТТНОГО КЛАССА В АРКТИКЕ

А. А. Саркисов, Д. О. Смоленцев, С. В. Антипов, В. П. Биладенко, П. А. Шведов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2017 г.

Одним из базовых факторов комплексного социально-экономического развития Арктической зоны России является опережающая адаптация технологий электроэнергетической отрасли к специфике изолированного энергоснабжения. С уменьшением масштаба рассматриваемой территории усиливается роль электроэнергетики в межотраслевых связях. Рассмотрены возможности применения атомных энергоисточников мегаваттного класса. Выделены группы перспективных потребителей, особенности жизненного цикла новых энергоисточников. Разработаны экономические модели, приводятся параметры эффективности.

Ключевые слова: арктические территории, изолированные энергосистемы, экономическая эффективность, финансовые модели, атомные станции малой мощности.

Введение

Комплексное социально-экономическое развитие Арктической зоны России требует опережающего развития технологий основных отраслей народного хозяйства, в частности электроэнергетики. Надежное обеспечение энергоресурсами существующих и перспективных потребителей является критически важной задачей. Адаптация к арктическим условиям, а также разработка новых, соответствующих специфике изолированных потребителей, энергоисточников — базовый фактор устойчивого развития Арктики. В этом контексте среди перспективных энергоисточников — атомных станций малой мощности (АСММ) целесообразно рассматривать отдельное направление — станции установленной электрической мощностью не более нескольких мегаватт. Атомным энергоисточникам мегаваттного класса аналогично всему направлению малой атомной энергетики соответствует обособленная ниша потенциального применения. Спектр потребителей этого диапазона мощности в Арктике достаточно многочислен и разнообразен: метеорологические и гидрологические станции и посты, навигационные маяки, научно-исследовательские базы, радиолокационные станции, аэродромы и сопутствующие

поселения. Частично указанные объекты входят в состав частей и подразделений Минобороны России, в то же время многие относятся к объектам гражданского назначения, и именно на последнюю группу ориентировано проводимое исследование.

Актуальность направления соответствует «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [1] в части наиболее значимых вызовов (см. подпункты д) и ж) пункта 15 этого документа): качественное изменение характера локальных энергетических систем, рост значимости энерговооруженности экономики, необходимость эффективного освоения и использования пространства, а также укрепление позиций России в области экономического, научного и военного освоения Арктики. И в части неразрешенных проблем, препятствующих научно-технологическому развитию страны (подпункт г) пункта 11 «Стратегии...»), практически отсутствует передача знаний и технологий между оборонным и гражданским секторами экономики, что сдерживает развитие и использование технологий двойного назначения. Госкорпорация «Росатом» выделяет разработку технологий и создание линейки реакторов малой и средней

мощности для энергообеспечения объектов гражданского и оборонного назначения в прибрежной, морской и океанской зонах арктических территорий России как стратегическое направление инновационного развития [2]. Контрольной точкой этого направления является реализация пилотного проекта создания АСММ на базе референтных решений к 2020 г.

В последнее время Минобороны России проявляет интерес к проектам АСММ мегаваттного класса. По данным СМИ¹, к 2023 г. планируется создание двух транспортабельных атомных энергоустановок мощностью 100 кВт (эл.) и 1 МВт (эл.). Общая потребность в таких энергоустановках оценивается не менее чем в 30 единиц для применения в районах Крайнего Севера и на арктических архипелагах, при этом не приводится информация о количественном разделении по мощностному ряду энергоустановок. Развитие технологий малой атомной энергетики в целях поддержания обороноспособности и защиты экономических и политических интересов страны неразрывно связано с возможностями гражданского использования атомных энергоисточников мегаваттного класса. Двойное применение технологий откроет новые области эффективного использования, а также снизит технологические и экономические риски реализации проектов.

Как правило, потребители мегаваттного диапазона отдалены и изолированы от местных энергообъединений, их энергообеспечение из-за экономической и технической (в том числе в плане надежности) нецелесообразности строительства линий электропередач, кабельных линий, теплотрасс в условиях вечной мерзлоты осуществляется от автономных дизельных электростанций (ДЭС), состоящих из нескольких дизель-генераторных установок (ДГУ). ДЭС располагаются в непосредственной близости от потребителей, при этом их установленная мощность и конфигурация определяются максимумом нагрузки с учетом резервирования и потерями в распределительной сети объекта.

В отличие от зон централизованной энергетики относительная конкурентоспособность АСММ в изолированных труднодоступных районах растет с уменьшением мощности, что связано с переходом в область применения ДЭС, работающих на дорогостоящем привозном топливе. Причем сравнительная экономическая эффективность таких АСММ явно выражена и лежит в плоскости капитальных и эксплуатационных затрат, а не проектных экстерналий. Концепции некоторых атомных энергоисточников мегаваттного класса, которые приведены ниже, подразумевают высокую степень их эксплуатационной автономности и необслуживаемость до момента вывода из эксплуатации, что улучшает их технико-экономические

характеристики и является основным конкурентным преимуществом.

Проводившиеся ранее исследования возможностей применения АСММ в Арктике были ориентированы на энергоустановки мощностью более 5—10 МВт (эл.) [3; 4]. Наименьшие по мощности АСММ, рассматриваемые в качестве альтернативных источников энергии для изолированных энергосистем и единичных объектов, — это проекты на базе реакторной установки (РУ) АБВ-6Э — 6 МВт (эл.) и 12 МВт (тепл.), а также унифицированной РУ «Шельф» — 6,4 МВт (эл.).

Общая потребность Арктической зоны России в энергоисточниках по скорректированному прогнозу [4], выполненному на основании данных проекта «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», с учетом износа основных средств объектов генерации к 2025 г. оценивается величиной до 10 ГВт (эл.). В то же время заявляется о планах ввода 2091 МВт (эл.) установленных мощностей² в Арктике до 2030 г. Таким образом, учитывая ограниченное бюджетное финансирование и приоритеты по развитию проектов, реальный темп ввода генерации (несколько гигаватт до 2030 г.) будет ниже перспективной потребности, в то же время в количественном выражении эта мощность будет выражаться сотнями единиц энергоустановок малой мощности. Существенное количество энергоисточников, необходимое для обеспечения потребностей арктического региона, отрывает возможности для серийного производства инновационной продукции и, как следствие, для снижения стоимости сооружения и владения.

Потенциальные потребители

Согласно данным сайта ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных» в России функционирует более 1000 метеорологических станций, из которых 98 находятся севернее 66° с. ш. В границах Арктической зоны России в целях осуществления круглогодичного мониторинга ледовых и гидрометеорологических условий для информационной поддержки федеральных органов исполнительной власти (Минтранса, Минобороны и др.), судоводных компаний, компаний нефтегазового сектора [6] действуют более 120 метеорологических и более 60 гидрологических морских станций и постов, 3 обсерватории (Баренцбург, им. Кренкеля, Тикси), научно-исследовательская «Ледовая база «Мыс Баранова». До 2020 г. планируется создать или модернизировать 20 метеорологических и 6 гидрологических морских станций и постов, арктический территориальный центр космического

¹ <http://www.innov-rosatom.ru/news/107>, <http://tass.ru/armiya-i-opk/2406087>, <http://tass.ru/armiya-i-opk/4508435>.

² <http://www.arctic.gov.ru/News/7923d3ef-cf70-e611-80cc-e672fe4e8e4e?nodeId=0778abc6-cd4b-e511-825f-10604b797c23>.

мониторинга. Энергопотребление метеорологических и гидрологических морских станций и постов в среднем не превышает нескольких киловатт, но на крупных обитаемых научно-исследовательских станциях может достигать 100 кВт.

Развитие транспортной инфраструктуры в Арктике связано с обеспечением радиолокационной и навигационной поддержки, радиосвязи по маршрутам Северного морского пути (СМП), а также с расширением присутствия гражданской авиации (включая кросс-полярные маршруты). Необходимая мощность для диспетчерских пунктов, радиолокационных станций в среднем лежит в диапазоне 50—200 кВт. Потребителем мегаваттного диапазона является еще один объект транспортной инфраструктуры — аэропорты (потребляемая мощность порядка нескольких мегаватт), которые при глобальном освоении арктических территорий будут иметь стратегическое значение не только для обеспечения безопасности северных рубежей, но и для поддержки инфраструктуры СМП и социально-экономического развития.

При расположении перечисленных объектов в непосредственной близости от населенных пунктов в зависимости от экономической целесообразности строительства воздушных линий электропередач необходимо рассматривать их совместное энергоснабжение. Расчетной коммунально-бытовой нагрузке 50 кВт соответствует населенный пункт с населением порядка 100—200 человек, 500 кВт — 800—1500 человек [7; 8]. При этом (на примере населенных пунктов северных улусов Якутии) установленная мощность ДЭС для изолированных потребителей превышает расчетную нагрузку в четыре-семь раз. В табл. 1 представлено количество населенных пунктов улусов Якутии, энергоснабжение которых осуществляется децентрализованно, с определенными диапазонами численности населения по данным Всероссийской переписи населения 2002 г.

Таблица 1. Количество населенных пунктов зон децентрализованного энергоснабжения Якутии с определенной численностью населения

Население, человек	Число населенных пунктов
100—200	39
201—500	83
501—1000	79
1001—2000	26
Более 2000	26

Другими перспективными потребителями являются крупные промышленные объекты нефтегазового промысла (разведочное и эксплуатационное бурение скважин, нефтедобыча), горно-обогатительные

комбинаты. Как правило, расчетная нагрузка таких потребителей [8; 9] превышает 5 МВт (бурение), 10 МВт (добыча), что относится к более высокому классу энергопотребления и области применения АСММ проектов АБВ-6Э и «Шельф».

Таким образом, можно выделить отдельное множество потребителей (единичных объектов и населенных пунктов) с установленной нагрузкой порядка от 100 кВт до нескольких мегаватт, располагающихся или планируемых в Арктической зоне России. Ниже рассмотрены проекты перспективных атомных энергоисточников мегаваттного класса и их возможности для энергоснабжения указанных групп потребителей.

Проекты атомных станций мегаваттного класса

Первыми отечественными проектами АСММ были как раз транспортабельные станции мегаваттного класса [10]. В 1960-х годах была создана и введена в опытную эксплуатацию транспортабельная теплоэлектростанция ТЭС-3 мощностью 1,5 МВт (эл.). Электростанция с водо-водяной РУ располагалась на четырех самоходных гусеничных платформах, ее развертывание в месте эксплуатации не предполагало дополнительных строительно-монтажных работ. Опыт реализации этого проекта был использован при проектировании атомной теплоэлектростанции «Север-2», состоящей из двух РУ АБВ-1,5. В 1963 г. была введена в эксплуатацию АСММ АРБУС (арктическая реакторная блочная установка) мощностью 750 кВт (эл.) с органическим теплоносителем. Планировалось, что к потребителю станция будет доставляться в виде 19 блоков массой не более 20 т каждый. Расчетная численность обслуживающего персонала составляла 17 человек. В 1970-х годах был разработан проект передвижной атомной электростанции «Памир-630Д» проектной мощностью 630 кВт. Реакторный и турбогенераторные блоки располагались на двух полуприцепах МА3-9994 грузоподъемностью 65 т, на отдельных прицепах располагались пульт управления и вспомогательный энергоблок. Время развертывания станции составляло 6 ч и не требовало специальной подготовки местности. Физический пуск первого опытного образца состоялся в 1985 г. В ходе испытаний были успешно отработаны основные технологические операции, хотя достигнутая мощность на клеммах генератора составила лишь половину от проектного значения.

К категории атомных энергоисточников мощностью до нескольких сотен киловатт относятся энергоустановки прямого преобразования энергии, которые ранее применялись для энергоснабжения аппаратуры космических аппаратов, например ядерные энергетические установки с термоэмиссионными преобразователями «Тополь», «Енисей» мощностью до 5 кВт (эл.), а также в световых и радиомаяках, навигационных буйках, метеостанциях — радиоизотопные термоэлектрические генераторы

Таблица 2. Основные характеристики актуальных проектов АСММ мегаваттного класса

Параметр	АТГОР	«Витязь»	«УниTERM»	Термоэлектрическая станция	
				ЯТЭГ-ЖСР	«Елена»
Тип РУ	Высокотемпературный газоохлаждаемый	Водо-водяной	Водо-водяной	На жидких солях	Водо-водяной
Мощность тепловая, МВт	Нет данных	6	15 (до 50 *)	До нескольких мегаватт	3,3
Мощность электрическая, МВт	1	1	3 (до 10 *) — в конденсационном режиме, 1,5 — в теплофикационном режиме	До 0,1	0,068 (до 0,1)
Отпуск тепла, Гкал/ч	1,2 (до 3,5)	2,6	4	—	До 2,5
Срок службы, лет	60	30	60	10—15	25
Количество обслуживающего персонала	До 20	До 20	25	—	—
Топливная кампания, лет	10 (25)	6—7	20—25	10—15	25
Автономность	Требует СМР на площадке *	Отсутствие СМР на площадке	11,5 мес работы без обслуживания с минимизацией объемов СМР на площадке	Полная автономность	Полная автономность, требует СМР на площадке
Возможность транспортировки	Доставка модулей на полуприцепах	Базирование модулей на четырех полуприцепах	Транспортировка отдельными блоками	Полная заводская готовность, транспортабельность	Транспортировка отдельными блоками

* В зависимости от конкретного проекта.

мощностью до 0,3 кВт (эл.). Развитие применения ядерных термоэлектрических установок для энергоснабжения децентрализованных энергообъединений обусловлено проведенными в 1980-х годах исследованиями с целью конверсии технологий в гражданский сектор [11]. Оптимальная мощность энергоисточника (100 кВт) была определена исходя из анализа режимов работы ДЭС и графиков нагрузок изолированных потребителей. В 1990-х годах был разработан технический проект атомной термоэлектрической станции «Елена» мощностью 68 кВт (эл.). Прототипом проекта являлась проработавшая более 20 лет опытная ядерно-электрическая установка «Гамма» мощностью 6,6 кВт (эл.). Проект «Елена» предусматривал 25 лет работы станции без перезагрузки топлива, полную автономность эксплуатации и заводскую готовность, а также массогабаритные характеристики,

позволяющие осуществлять транспортировку воздушным или водным транспортом.

Аналогично потенциальным потребителям современные проекты атомных энергоисточников мощностью до нескольких мегаватт можно условно разделить на два класса:

- необслуживаемые ядерные энергетические установки с концепцией прямого преобразования тепловой энергии в электрическую установленной мощностью до нескольких сотен киловатт (эл.);
- транспортабельные АСММ установленной мощностью порядка нескольких мегаватт (эл.).

В табл. 2 представлены основные характеристики актуальных проектов АСММ мегаваттного класса.

Практическая реализация приведенных в табл. 2 атомных энергоустановок находится на стадии концептуальных проектов, при этом все разработки имеют рабочие прототипы и референции. В табл. 2

указаны наиболее вероятные параметры энергоустановок по данным открытых источников, например [3; 12—16], которые, в свою очередь, могут уточняться или изменяться на дальнейших стадиях развития проектов.

Основными преимуществами актуальных проектов атомных энергоисточников мегаваттного класса являются:

- полная или высокая степень заводской готовности к эксплуатации, следствием чего являются отсутствие или минимизация строительно-монтажных работ на целевой площадке, сокращение времени развертывания и готовности к выдаче мощности;
- транспортабельность к месту размещения всей станции, отдельных модулей или блоков существующими способами доставки (массогабаритные характеристики, позволяющие осуществлять перевозку железнодорожным, авто- и авиатранспортом);
- высокая автономность эксплуатации;
- перенос функций по обслуживанию энергоустановок на специализированные площадки (если проектом предусмотрены ремонтные процедуры в течение жизненного цикла станции);
- независимость от обеспечения топливом (проекты предусматривают длительный интервал работы станции с одной топливной загрузкой — от 6 лет либо полное исключение перегрузок ядерного топлива на всем жизненном цикле — до 25 лет);
- минимизация обслуживающего персонала или его отсутствие; возможность совмещения высококвалифицированным персоналом функций по обслуживанию объектов-потребителей и энергоисточника;
- независимость большинства проектов от местных водных ресурсов (немаловажный фактор при размещении станций в зонах вечной мерзлоты);
- возможность работы в режиме когенерации;
- упрощение процедур снятия с эксплуатации, вывоз отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО) вместе с энергоустановкой;
- модульный принцип компоновки при формировании необходимой мощности и возможность ее варьирования в зависимости от потребностей целевой площадки;
- снижение экологической нагрузки на регион размещения за счет отсутствия выбросов при сжигании углеводородного топлива, сокращения объемов хранения топлива и транспортно-логистических операций по его доставке;
- наличие групп потенциальных потребителей (в том числе и перспективных), численность которых предоставляет возможность серийного производства станций и, как следствие, снижения стоимости создания, обслуживания и других процедур жизненного цикла;
- повышение точности определения экономической эффективности при прогнозировании денежных потоков, относящихся к обеспечению топливом объектов генерации, в долгосрочной перспективе;

- снижение влияния проектных экстерналий, связанных с субсидированием процедуры северного завоза топлива.

В проектах АСММ мегаваттного класса рассматривается возможность обосновать уменьшение размеров санитарно-защитной зоны для обеспечения размещения энергоисточника в непосредственной близости от потребителя, что немаловажно в условиях Арктики, в частности для обеспечения теплоснабжения.

Масштабное применение рассматриваемых энергоустановок с учетом текущей стадии проработки проектов и специфики использования потенциальных источников радиационной опасности требует решения ряда задач:

- подготовки научно-производственной базы для проведения стендовых испытаний отдельных узлов и создания пилотных образцов энергоустановок;
- разработки ядерного топлива (тепловыделяющих элементов, энергогенерирующих каналов) с высокими эксплуатационными характеристиками, позволяющими увеличить продолжительность топливной кампании и сократить массогабаритные характеристики станции;
- мобилизации промышленных мощностей для организации серийного производства станций высокой степени готовности к эксплуатации (в том числе для проведения полного объема пуско-наладочных работ на предприятиях-изготовителях);
- разработки систем безопасности и защитных барьеров РУ, основанных на принципах внутренней самозащитности и пассивной безопасности, исключающих возможность реализации аварийных событий и возможность выхода радиации при нормальных режимах эксплуатации;
- проработки механизмов по обращению с РАО и ОЯТ и выводу станций из эксплуатации с учетом инфраструктуры, технологий и опыта по утилизации атомных подводных лодок, атомных судов технологического обслуживания; процедуры по обращению с РАО и ОЯТ должны укладываться в общие проектные ограничения;
- формирования механизмов финансового обеспечения завершающих стадий проекта и обращения с ОЯТ (создания специализированных резервов);
- организации опережающей подготовки производственного и эксплуатационного персонала, создания цифровых и полномасштабных учебных стендов, пультов управления для отработки режимов эксплуатации;
- адаптации нормативной базы к новому виду объектов использования атомной энергии, разработки изменений и дополнений к федеральным нормам и правилам;
- обеспечения физической защиты станций в гражданском секторе применения, разработки соответствующей нормативной базы;

- развития систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга с обеспечением инструментальной, программно-технической и организационной поддержки.

К отрицательным особенностям такого вида энергоустановок можно отнести высокие начальные капиталовложения. На данный момент существуют только предварительные оценки стоимости станций, но можно утверждать, что стоимость АСММ будет как минимум на порядок превосходить стоимость аналогичных традиционных энергоисточников. Одной из основных задач при проектировании АСММ мегаваттного класса будет определение баланса между стремлением к абсолютной безопасности, ограниченным снизу требованиями к безопасности, и экономической эффективностью.

Конкурентоспособность всего мощностного ряда атомных электростанций определяется величиной капиталовложений. Доля начальных инвестиций в удельных интегральных затратах (levelized cost of electricity — LCOE) для АЭС-«миллионников» достигает 60%, для АСММ — 70%, для АСММ мегаваттного класса, требующих наличия эксплуатационного персонала и обслуживания, — 77%, необслуживаемых — 90%. Таким образом, экономическая эффективность АСММ мегаваттного класса в основном будет зависеть от точности определения необходимых капиталовложений для создания энергоисточников. Расчет по аналогам с последующим применением базисно-индексного метода в данном случае не применим, ресурсный метод расчета сметной стоимости возможен только на дальнейших стадиях проектирования, после окончательного определения технического облика проекта. Для экономических оценок в условиях неопределенности NEA OECD предложена формула качественного описания зависимости удельных капиталовложений АСММ от их мощности [17; 18]:

$$k_1 = k_2 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{n-1},$$

где P — мощность энергоблока; k — удельные капиталовложения; n — коэффициент масштаба.

Было определено, что коэффициент масштаба для АЭС с водо-водяными РУ мощностью от 300 до 1350 МВт (эл.) находится в диапазоне от 0,4 до 0,7. Коэффициент масштаба, подобранный на основании анализа открытых данных по проектам АСММ, ориентировочно составляет 0,6. Причем как в случае отдельного рассмотрения проектов АСММ с реакторными установками, где теплоносителем является вода под давлением, так и в случае совместного рассмотрения всех актуальных проектов значение коэффициента изменяется незначительно.

Таким образом, если за единицу принять удельные капиталовложения в АСММ мощностью 100 МВт, коэффициент увеличения удельных капиталовложений

для мощности 50 МВт составит 1,3, для мощности 10 МВт — 2,5, для мощности 1 МВт — 6,3. Стоит отметить, что наибольшую неопределенность этот метод имеет в области установленной мощности менее 1 МВт, поскольку ближайшие референтные значения соответствуют мощности 6 МВт: проект АБВ-6Э (мощность 6 МВт, стоимость строительства головной станции оценивается в 5 млрд руб.), проект «Шельф» (мощность 6,4 МВт, стоимость строительства головной станции оценивается в 7—8 млрд руб., серийной — в 5,2 млрд руб.). При серийном производстве можно ожидать снижения стоимости АСММ на 30—40% (примерно 15% для второй станции в серии, примерно 5% для третьей и последующих при дальнейшей стабилизации на уровне 60—70% от головного образца).

Принимая во внимание проведенные оценки удельных капиталовложений и заявляемые разработчиками стоимостные характеристики энергоустановок, стоимость серийных образцов транспортных АСММ мощностью 1 МВт может оцениваться в 2—3 млрд руб. (без учета самоходной базы, если это предусмотрено проектом), мощностью 100 кВт — до 1 млрд руб. При оценке LCOE атомных энергоисточников мегаваттного класса в прогнозных ценах учет эксплуатационных расходов был произведен пропорционально (по установленной мощности) аналогичным показателям для станций более высокого мощностного диапазона с применением коэффициента масштаба (верхняя граница оценки) и без него (нижняя граница). LCOE энергоустановки мощностью 1 МВт и необслуживаемой энергоустановки мощностью 100 кВт оценивается в 27—31 и 70—86 руб./кВт·ч соответственно.

Энергоснабжение изолированных потребителей

Основными энергоисточниками в зонах децентрализованного энергоснабжения являются ДЭС. Установленная мощность ДЭС в несколько раз превосходит расчетную нагрузку и используется неэффективно. Графики суточной нагрузки единичных потребителей и малых населенных пунктов Арктики характеризуются неравномерностью и низкой плотностью. Эксплуатация ДЭС в режимах следования за нагрузкой сокращает межремонтные интервалы до 50% [5] и увеличивает удельный расход топлива до 30% в среднем и до 70% в часы наиболее низких нагрузок. Номинальный расход топлива ДГУ составляет 200—230 г/кВт·ч.

Типовая конфигурация ДЭС для потребителей с уровнем нагрузки порядка 1 МВт — шесть ДГУ мощностью 300 кВт, три из которых находятся в работе, одна в горячем и две в холодном резерве, либо четыре ДГУ мощностью 500 кВт, две из которых находятся в работе, одна в холодном и одна в горячем резерве с расходом топлива 4—5 л/ч. Для потребителя с уровнем нагрузки порядка 100 кВт — две ДГУ мощностью 100 кВт, одна из которых находится

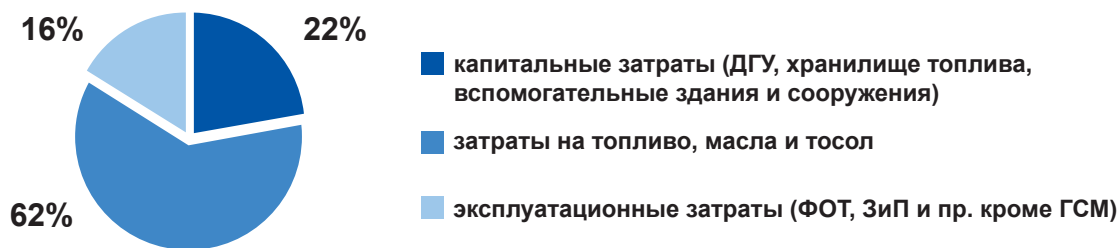


Рис. 1. Расчетная структура LCOE ДЭС

в эксплуатации, другая в горячем резерве с расходом топлива 2—3 л/ч. Бесперебойное энергоснабжение потребителей в расчете на нагрузку в 100 кВт требует ежегодного завоза более 100 т дизельного топлива, а также моторного масла (ориентировочно 0,5% от объема топлива), тосола и ЗиП. Необходимо соорудить хранилища топлива соответствующего объема на целевой площадке. Стоимость дизельного топлива является определяющим фактором экономической эффективности ДЭС, поскольку превышает 60% в расчетной структуре LCOE (рис. 1).

В свою очередь, стоимость дизельного топлива состоит из закупочной цены и транспортной составляющей (авто- или авиадоставка, фрахт, хранение, складские операции). С учетом удаленности рассматриваемых потребителей зон децентрализованного энергоснабжения от транспортных маршрутов при осуществлении процедуры северного завоза доля транспортной составляющей в структуре стоимости топлива может достигать 80%. При этом конечная стоимость дизельного топлива растет до значений 60—80 тыс. руб./т (при доставке авиацией — 100—140 тыс. руб./т).

Численность эксплуатационного персонала для ДЭС описанных конфигураций составляет 5—10 человек. Затраты по их содержанию включают фонд оплаты труда с начислениями и затраты на услуги сторонних организаций по обеспечению транспортного обслуживания, питания, по обеспечению расходными материалами. При соответствующей профессиональной подготовке возможно совмещение персоналом функций обслуживания объектов-потребителей и энергоисточника.

LCOE ДЭС в районах децентрализованного энергообеспечения для потребителей с уровнем нагрузок порядка 1 МВт составляет от 30 до 50 руб./кВт·ч, для нагрузок 100 кВт и при доставке дизельного топлива авиацией достигает 80 руб./кВт·ч.

Конкурентоспособность

Проведенные оценки LCOE атомных энергоисточников и существующих схем энергоснабжения на базе ДГУ в мощностных диапазонах 1 МВт и 100 кВт свидетельствуют об экономической конкурентоспособности АСММ в зонах децентрализованного энергоснабжения. Для снижения абстрактности расчетов экономической эффективности, возникающих

при расчете LCOE в условиях применения прогнозных индексов и дисконтирования денежных потоков, были рассчитаны интегральные затраты по каждому энергоисточнику (рис. 2 и 3). Применение затратных моделей оправдано при отсутствии необходимости отдачи от инвестиций для стратегически важных проектов. Рассмотрены два сценария: минимальных ожидаемых и максимальных ожидаемых значений затрат.

Интегральные затраты, представленные на рис. 2 и 3, по каждому энергоисточнику и диапазону мощности включают:

- начальные капитальные расходы на сооружение объекта генерации;
- капитальные расходы на сооружение вспомогательных объектов (хранилище топлива, бытовые постройки для персонала, если применимо);
- эксплуатационные расходы (топливо, фонд оплаты труда с начислениями (если применимо), ЗиП, расходные материалы, услуги сторонних организаций и пр.);
- ежегодные амортизационные отчисления на полное восстановление основных фондов объектов генерации до конца расчетного периода.

Прогнозный период в 20 лет для демонстрации относительной конкурентоспособности выбран исходя из средних значений сроков эксплуатации целевых потребителей и энергоисточников. Рост эксплуатационных затрат рассчитан на основе прогноза Минэкономразвития России значения отраслевого индекса цен производителей. Налоговая нагрузка, сборы и отчисления в специализированные фонды не учитывались.

Боле быстрые темпы роста интегральных затрат ДГУ связаны с высоким уровнем эксплуатационных расходов, которые, в свою очередь, обусловлены сложностью и дороговизной доставки дизельного топлива в труднодоступные районы, высокими темпами износа основных средств, низкоэффективным режимом работы ДГУ. Эксплуатационные затраты атомных энергоисточников ввиду высокой автономности их работы значительно ниже аналогичных показателей для ДЭС и практически не подвержены инфляционным изменениям. Для необслуживаемого атомного энергоисточника мощностью 100 кВт эксплуатационная составляющая интегральных затрат практически отсутствует.

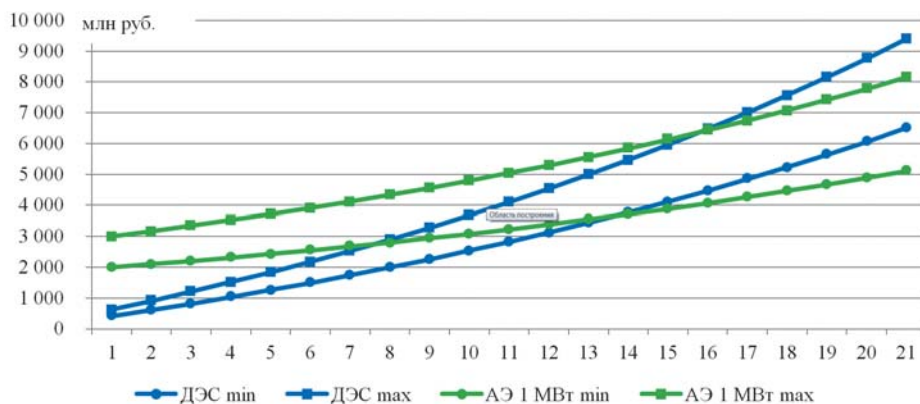


Рис. 2. Интегральные затраты по энергоисточникам мощностью 1 МВт

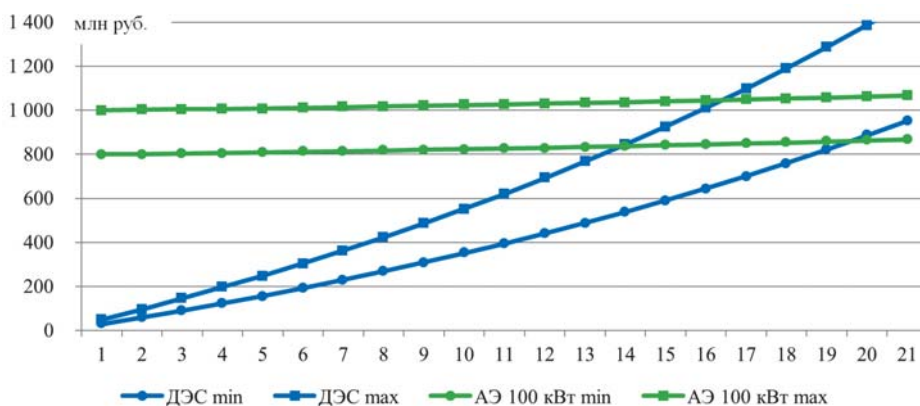


Рис. 3. Интегральные затраты по энергоисточникам мощностью 100 кВт

Несмотря на более высокий уровень начальных затрат в создание атомных энергоисточников, относительная конкурентоспособность по интегральным затратам достигается на 13—16-й годы эксплуатации для уровня мощности 1 МВт и на 15—19-й годы эксплуатации для уровня мощности 100 кВт. Необходимо отметить, что представленные экономические оценки, особенно в части атомных энергоисточников, будут изменяться при уточнении технико-экономических характеристик проектов на последующих стадиях их проработки.

В условиях неопределенности технико-экономических характеристик сравниваемых энергоисточников и высокой чувствительности показателей экономической эффективности к исходным данным целесообразно оценить пороговое (максимальное) значение капиталовложений предлагаемой энергетической альтернативы, при котором проект еще будет конкурентоспособен. Такая практика широко применяется при определении целевой и предельной стоимости строительства объектов генерации. Учет порогового значения капиталовложений в меняющихся внешних экономических условиях будет способствовать эффективному принятию решений по проектным развилкам с сохранением статуса конкурентоспособности.

Определение пороговых значений начальных капиталовложений в атомные энергоисточники осуществлялось двумя способами: приравнением значения LCOE или интегральных затрат к аналогичным показателям ДЭС при прочих равных условиях. Горизонт расчета был выбран в соответствии с ожидаемым сроком эксплуатации атомных энергоисточников: 30 лет для уровня мощности 1 МВт и 20 лет для уровня мощности 100 кВт. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Пороговые значения стоимости АСММ мегаваттного класса, млрд руб.

Способ расчета	Мощность АСММ	
	100 кВт	1 МВт
Метод LCOE	0,7—1,1	4,5—5,8
Метод интегральных затрат	0,9—1,4	6,1—7,6

Нижняя граница оценки соответствует минимальным ожидаемым затратам, верхняя — максимальным. Таким образом, оцененная ранее стоимость атомного энергоисточника мощностью 1 МВт (2—3 млрд руб.) обладает большим запасом перед пороговыми значениями, а стоимость энергоисточника мощностью 100 кВт (1 млрд руб.) находится

в пределах пороговых значений, что должно учитываться при техническом проектировании. Оценка свидетельствует о существовании запаса экономической эффективности АСММ относительно существующих схем энергообеспечения на базе ДЭС.

Традиционно АЭС обеспечивает базовую выработку электроэнергии, не участвуя в суточном маневрировании. Большинство проектов АСММ подразумевает возможность изменения мощности, что является причиной дополнительных требований к топливу и конструкции РУ. В условиях низкой плотности графика нагрузок целевых потребителей целесообразно применение накопителей энергии как наиболее доступной технологии, не изменяющей принцип максимальной автономности атомных энергоустановок мегаваттного класса (транспортбельность, независимость от топлива, необслуживаемость и т. д.).

Применение систем накопления энергии совместно с АСММ, работающими в режимах, близких к базовым, позволит:

- улучшить характеристики топливной кампании (глубина выгорания, длительность);
- снизить требования к топливу в части обеспечения маневренности;
- увеличить межремонтные интервалы вспомогательного оборудования;
- уменьшить потери в распределительной сети объекта;
- уменьшить резерв установленной мощности основного оборудования.

Выводы

Опережающее развитие энергетических технологий с адаптированными особенностями жизненного цикла является критически важной задачей для обеспечения высоких темпов социально-экономического развития арктических территорий. Основанные на принципе максимальной автономности в аспектах сооружения, эксплуатации, вывода из эксплуатации, обращения с ОЯТ атомные энергоисточники мегаваттного класса имеют высокий потенциал применения в Арктике как с точки зрения потребности, так и с точки зрения экономической эффективности. При дальнейшем развитии проектов масштабного применения АСММ мегаваттного класса должен быть решен ряд технических и организационных задач формирования конечного облика системы атомных энергоисточников мощностью 100 кВт и 1 МВт с учетом сохранения конкурентоспособности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00947.

Литература

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. — Утв. указом Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642.

2. Паспорт программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года (в гражданской части). — М., 2016. — 76 с.

3. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. — Т. 2 / Под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. — М.: Академ-Принт, 2015. — 387 с. — URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1930389.

4. Смоленцев Д. О. Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 3 (7). — С. 22—29.

5. Сиразетдинов О. В., Кононенко В. Ю. Отечественная технология накопления электрической энергии — новый подход к эффективному и надежному электроснабжению объектов в Арктике: Доклад на международном военно-техническом форуме «Армия-2015».

6. Ашик И. М. Гидрометеорологическое обеспечение мореплавания и обеспечение информацией о ледовой обстановке в акватории арктических морей России: Презентация с заседания рабочей группы «Обеспечение экологической безопасности и рационального использования природных ресурсов» в составе Государственной комиссии по вопросам развития Арктики, 2017 г.

7. Лукутин Б. В., Киушкина В. Р. Ветроэлектростанция в автономной энергетике Якутии. — Томск: Изд-во ТПУ, 2006. — 202 с.

8. Справочник по проектированию электрических сетей. — 4-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Д. Л. Файбисовича. — М.: ЭНАС, 2012. — 376 с.

9. Моргунова М. О., Соловьев Д. А. Энергоснабжение российской Арктики: углеводороды или ВИЭ // Энергет. политика. — 2016. — № 5. — С. 44—51.

10. Полушкин К. К., Емельянов И. Я., Деленс П. А. и др. Атомная электростанция «Арбус» с органическим теплоносителем и замедлителем // Атом. энергия. — 1964. — Т. 17, вып. 6. — С. 439—452.

11. История атомной энергетики Советского Союза и России: Сб. статей. — Вып. 1—5. — Вып. 5: История малой атомной энергетики / Рос. науч. центр «Курчат. ин-т»; Под ред. В. А. Сидоренко. — М.: ИздАТ, 2004. — 168 с.

12. Сб. тезисов докладов 13-й Международной научно-практической конференции по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурсы». — Севастополь: Оргкомитет МНПК АЭ-2017, 2017. — 132 с.

13. Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: Сб. докладов IV Международной научно-технической конференции (27—30 сентября 2016 г., Москва). — Т. 1. — М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2016. — 679 с.

14. Пименов А. О., Кудинов В. В., Куликов Д. Г. Атомная генерация в обеспечение развития локальных энергетических сетей в Арктическом регионе: Презентация доклада на IV Международном форуме «NDEхро 2017». — М., 2017.

15. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-Term Deployment. — [S. l.]: OECD, 2016. — (NEA No. 7213).
16. Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors / NEA. — [S. l.]: OECD, 2011.
17. Approaches for assessing the economic competitiveness of small and medium sized reactors. — Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2013.
18. Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants / OECD. — Paris, France (IEA/NEA 2000), 2000.

Информация об авторах

Саркисов Ашот Аракелович, академик РАН, доктор технических наук, советник РАН, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52).

Смоленцев Дмитрий Олегович, научный сотрудник, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: dsmol@ibrae.ac.ru.

Антипов Сергей Викторович, доктор технических наук, заместитель директора, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52).

Билашенко Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52).

Шведов Павел Алексеевич, заместитель заведующего отделом, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52).

Библиографическое описание данной статьи

Саркисов А. А., Смоленцев Д. О., Антипов С. В., Билашенко В. П., Шведов П. А. Экономическая эффективность и возможности применения атомных энергоисточников мегаваттного класса в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 4—14. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-4-14.

ECONOMIC EFFICIENCY AND POSSIBILITIES OF USING MEGAWATT-CLASS NUCLEAR POWER SOURCES IN THE ARCTIC

Sarkisov A. A., Smolentsev D. O., Antipov S. V., Bilashenko V. P., Shvedov P. A.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The reported study was funded by RFBR according to the research project №17-08-00947

Abstract

Advanced adaptation of electric-power technologies to the specifics of self-contained power supply is one of the basic factors for complex socio-economic development of the Russian Arctic zone. With a decrease in the size of the territory under consideration the role of electric power industry in inter-branch relations is growing, and thus reliable electric power supply to existing and prospective consumers of the Arctic region becomes crucially important. The possibility of using megawatt-class Nuclear Power Sources (NPS) is discussed. Groups of prospective consumers with a power range up to several MW are distinguished. Features of the NPS life cycle based on maximum self-sufficiency in construction, operation, decommissioning, and spent fuel management are described. A list of technical and managerial issues when finalizing the system of megawatt-class NPS is provided. Economic models of using megawatt-class NPS and estimates of their relative competitive ability (the LCOE and integration costs methods) have been developed. Parameters of economic efficiency of megawatt-class NPS are provided.

Keywords: *Russian Arctic, isolated energy systems, economic efficiency, financial models, low-power nuclear power plants.*

References

1. Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii. [The Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation]. Utv. ukazom Prezidenta RF ot 1 dekabrya 2016 g. № 642. (In Russian).
2. Passport programmy innovatsionnogo razvitiya i tekhnologicheskoi modernizatsii Goskorporatsii «Rosatom» na period do 2030 goda (v grazhdanskoi chasti). [Passport of the Program for Innovative Development and Technological Modernization of ROSATOM State Corporation up to 2030 (the Civil Part)], Moscow, 2016, 76 p. (In Russian).
3. Atomnye stantsii maloi moshchnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki. [Low-power Nuclear Power Plants – a New Line in the Development of Power Systems]. Vol. 2. Pod red. akad. RAN A. A. Sarkisova. Moscow, Akadem-Print, 2015, 387 p. Available at: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1930389. (In Russian).
4. Smolentsev D. O. Razvitie energetiki Arktiki: problema i vozmozhnosti maloi generatsii. [Development of

the Arctic energy sector: problems and capabilities of low-power generation]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2012, no. 3 (7), pp. 22—29. (In Russian).

5. *Sirazetdinov O. V., Kononenko V. Yu.* Otechestvennaya tekhnologiya nakopleniya elektricheskoi energii — novyi podkhod k effektivnomu i nadezhnomu elektrosnabzheniyu ob"ektov v Arktike [Domestic electric energy storage technology as a new approach to effective and reliable power supply of facilities in the Arctic]: Doklad na mezhdunarodnom voenno-tekhnicheskom forumе "Armiya-2015". (In Russian).

6. *Ashik I. M.* Gidrometeorologicheskoe obespechenie moreplavaniya i obespechenie informatsiei o ledovoi obstanovke v akvatorii arkticheskikh morei Rossii [Hydrometeorological support of navigation and information support on ice conditions in the Russian Arctic seas]: Prezentatsiya s zasedaniya rabochei gruppy "Obespechenie ekologicheskoi bezopasnosti i ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnykh resursov" v sostave Gosudarstvennoi komissii po voprosam razvitiya Arktiki, 2017 g. (In Russian).

7. *Lukutin B. V., Kiushkina V. R.* Vetroelektrostantsii v avtonomnoi energetike Yakutii. [Wind Power Plants in the Self-contained Power System of Yakutia]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2006, 202 p. (In Russian).

8. Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setei. [Reference Book for the Design of Electrical Networks]. 4-e izd., pererab. i dop. Pod red. D. L. Faibisoviicha. Moscow, ENAS, 2012, 376 p. (In Russian).

9. *Morgunova M. O., Solov'ev D. A.* Energosnabzhenie rossiiskoi Arktiki: uglevodorody ili VIE. [Power supply of the Russian Arctic: hydrocarbons or renewable sources]. *Energet. politika*, 2016, no. 5, pp. 44—51. (In Russian).

10. *Polushkin K. K., Emel'yanov I. Ya., Delens P. A. et al.* Atomnaya elektrostantsiya "Arbus" s organicheskim teplositelem i zamedlitelem. ["ARBUS" nuclear power plant with organic coolant and moderator]. *Atom. energiya*, 1964, vol. 17, iss. 6, pp. 439—452. (In Russian).

11. *Istoriya atomnoi energetiki Sovetskogo Soyuza i Rossii: Sb. statei.* [The History of Nuclear Power of the Soviet Union and Russia: a Collection of Articles], iss. 1—5, iss. 5: *Istoriya maloi atomnoi energetiki.* Ros. nauch. tsentr "Kurchat. in-t"; Pod red. V. A. Sidorenko. Moscow, IzdAT, 2004, 168 p. (In Russian).

12. Sb. tezisov dokladov 13-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po atomnoi energetike "Bezopasnost', effektivnost', resurs" [The 13th International Scientific and Practical Conference on Atomic Energy: "Safety, Efficiency, and Resource"]. Sevastopol', Orgkomitet MNPK AE-2017, 2017, 132 p. (In Russian).

13. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii yadernoi energetiki: Sb. dokladov IV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (27—30 sentyabrya 2016 g., Moskva).* [The Fourth International Scientific and Technical Conference "Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power", collection of reports. 2016, Moscow]. Vol. 1. Moscow, Izd-vo AO "NIKIET", 2016, 679 p. (In Russian).

14. *Pimenov A. O., Kudinov V. V., Kulikov D. G.* Atomnaya generatsiya v obespechenie razvitiya lokal'nykh energeticheskikh setei v Arkticheskom regione [Nuclear generation to support development of local energy networks in the Arctic region]: Prezentatsiya doklada na IV Mezhdunarodnom forumе "NDExpо 2017". Moscow, 2017. (In Russian).

15. *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-Term Deployment.* [S. I.], OECD, 2016. (NEA No. 7213).

16. *Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors.* NEA. [S. I.], OECD, 2011.

17. *Approaches for assessing the economic competitiveness of small and medium sized reactors.* Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2013.

18. *Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants.* OECD. Paris, France (IEA/NEA 2000), 2000.

Information about the authors

Sarkisov Ashot Arakelovich, Academician, Doctor of Technical Sciences, Advisor of the Russian Academy of Sciences, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, Russia, 115191).

Smolentsev Dmitry Olegovich, Researcher of Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, Russia, 115191), e-mail: dsmol@ibrae.ac.ru.

Antipov Sergey Victorovich, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, Russia, 115191).

Bilashenko Vyacheslav Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, Russia, 115191).

Shvedov Pavel Alekseyevich, Deputy Head of Department of Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, Russia, 115191).

Bibliographic description

Sarkisov A. A., Smolentsev D. O., Antipov S. V., Bilashenko V. P., Shvedov P. A. Economic Efficiency and Possibilities of Using Megawatt-class Nuclear Power Sources in the Arctic. *Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 1 (29), pp. 4—14. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-4-14. (In Russian).