

УДК 621.039.5

## **ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ – БОЛЬШИЕ ОЖИДАНИЯ**

**А.Ю. Гагаринский**

*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"*

Ядерные установки малой мощности стали неотъемлемой частью атомной техники в двух больших областях человеческой деятельности: на них основаны атомный флот и исследовательские реакторы для науки и обучения, которые получили широкое распространение в десятках стран и сегодня являются основной тренировочной базой для воспитания новых атомщиков мира. Следует отметить, что атомные станции малой мощности с их очевидными преимуществами перед традиционными источниками энергии на труднодоступных территориях, несмотря на огромное стремление и обоснованные надежды разработчиков, пока что не стали весомым направлением в энергетике. В регулярно обновляющейся базе данных МАГАТЭ по малым реакторам в настоящее время приводятся данные по более чем 50 проектам из десятка стран. Однако только три демонстрационные установки находятся в стадии строительства: интегральный PWR CAREM в Аргентине, газоохлаждаемый реактор HTR-PM в Китае и плавучая атомная станция с реакторами КЛТ-40С в России. Начало их эксплуатации ожидается между 2019 и 2022 годами. Тем не менее, в мировом научном сообществе последние несколько лет наблюдается всплеск интереса к "вечной" теме атомных станций малой мощности. Эксперты дружно пророчат этому направлению перспективу коммерциализации в самые ближайшие годы. В целом ситуацию хорошо описывает заимствованный из классики термин "большие ожидания".

В данном обзоре кратко представлена история развития направления малых реакторов для стационарной и транспортабельной энергетике. Обсуждаются современные состояние и перспективы атомных станций малой мощности в мире и России.

**Ключевые слова:** ядерные реакторы, атомные станции малой мощности, стационарные, мобильные, блочно-транспортабельные ядерные установки, плавучая атомная электростанция.

**Введение.** Малые ядерные установки в мировой технике, безусловно, состоялись. Компактные ядерные реакторы с огромной энергоёмкостью ядерного топлива совершили революцию в подводном флоте и кардинально изменили военную стратегию. Да и в отдельных областях надводного флота (авианосцы, тяжёлые крейсеры, ледоколы) они оказались труднозаменимыми. Исследовательские реакторы малой мощности для науки и обучения, в основном американского и

советского дизайна, получили широкое распространение в десятках стран и сегодня являются основной тренировочной базой для воспитания новых атомщиков мира.

Но атомные станции малой мощности (АСММ) с их очевидными преимуществами перед традиционными источниками энергии на труднодоступных территориях, несмотря на огромное стремление и обоснованные надежды разработчиков, пока что так и не стали весомым направлением в энергетике.

В регулярно обновляющейся базе данных МАГАТЭ по малым реакторам [1] в настоящее время приводятся данные по более чем 50 проектам из десятка стран. Однако только три демонстрационные установки находятся в стадии строительства: интегральный PWR CAREM в Аргентине, газоохлаждаемый реактор HTR-PM в Китае и плавучая атомная станция с реакторами КЛТ-40С в России. Начало их эксплуатации ожидается между 2019 и 2022 годами.

Такое положение дел в этом широко обсуждаемом направлении развития мирового реакторостроения, очевидно, нуждается в объяснении.

***Коротко об истории.*** Первоначальные усилия по созданию малых атомных станций, как стационарных, так, в ещё большей степени, блочно-транспортбельных, передвижных или плавучих, были сосредоточены в США и СССР. Единичные установки в других странах были, скорее, "экзотическими исключениями" из правила, как, например, спрятанная в скале под Стокгольмом 12-мегаваттная атомная электростанция (АЭС) Агеста (1964–74 годы), созданная не только для энергоснабжения, но и для наработки плутония на случай его необходимости для шведской армии.

В самом начале 1950-х годов серьёзное внимание к АСММ было проявлено в США, в значительной степени благодаря возникшему интересу со стороны армии. За короткий период с декабря 1956 года до октября 1957 года четыре маленьких реактора в США начали генерировать электричество. В этих реакторах использовались три различные технологии (кипящие, с водой под давлением и с натриевым охлаждением), к тому же установки юридически представляли разные формы организации: построенные в государственных лабораториях экспериментальный кипящий реактор EBWR с плутониевым топливом начальной мощностью 5 МВт(э) в Аргоннской национальной лаборатории и охлаждаемый натрием графитовый реактор SRE мощностью 5,7 МВт(э) на площадке авиационной лаборатории в Калифорнии; прототип армейского реактора SM-1 мощностью 2 МВт(э) на военной базе в Вирджинии и даже первая частная атомная станция, построенная по лицензии Комиссии по атомной энергии для энергетических целей (Wallecitos Boiling Water Reactor, 5 МВт(э)) [2].

Отдельно следует остановиться на армейской программе создания атомных станций для энергоснабжения удалённых военных баз. За первым реактором

SM-1 последовали ещё семь портативных или транспортабельных реакторов в диапазоне мощностей от 0,3 до 3  $MВт(э)$ , эксплуатировавшихся на Аляске, в Гренландии и даже в Антарктиде. В 1968 году на озере вблизи Панамского канала появилась плавучая американская АЭС МН-1А Sturgis мощностью 10  $MВт(э)$ . Она проработала 8 лет и обеспечивала проход судов по каналу, в основном, для переброски войск во Вьетнам.

В Советском Союзе стратегические работы в области малой атомной энергетики были начаты в середине 1950-х годов [3]. В октябре 1956 года было принято правительственное решение о создании таких атомных станций. Упомянем о нескольких интересных проектах, достигших стадии реализации. После выхода в 1957 году правительственного поручения о строительстве первой демонстрационной АСММ, получившей название ТЭС-3 ("транспортабельная электрическая станция"), такая установка с водо-водяным реактором мощностью 1500  $кВт(э)$  была спроектирована, сооружена и проработала 6 лет (до 1966 года) – правда, только на площадке Физико-энергетического института, рядом с первой АЭС.

С 1963 до 1988 год в НИИАР работала созданная под руководством Курчатовского института экспериментальная блочно-транспортабельная атомная станция АРБУС ("арктическая реакторная блочная установка") мощностью 750  $кВт(э)$  с высококипящим органическим теплоносителем. Первоначально такая установка (второй комплект был уже изготовлен) предназначалась для эксплуатации на станции "Молодёжная" в Антарктиде, затем, уже тепловой мощностью 30 МВт, – на одном из приисков золотодобычи в Хабаровском крае. К сожалению, недостатки органического теплоносителя оказались сильнее его достоинств, и работы по этому направлению (так же как практически одновременно в США и несколько позже в Канаде) были свёрнуты.

Стоит упомянуть о мобильной установке на колёсном ходу "Памир-630-Д", созданной в Институте атомной энергетики Белорусской ССР по заказу Министерства обороны. В установке в качестве теплоносителя и рабочего тела турбины использовался диссоциирующий тетраоксид азота ( $N_2O_4$ ). Дело было доведено до двух опытных образцов передвижной АСММ и проведения её испытаний. События 1986 и 1991 годов остановили и эту работу. Мировой опыт создания мобильных и блочно-транспортабельных АЭС приводится на рис. 1.

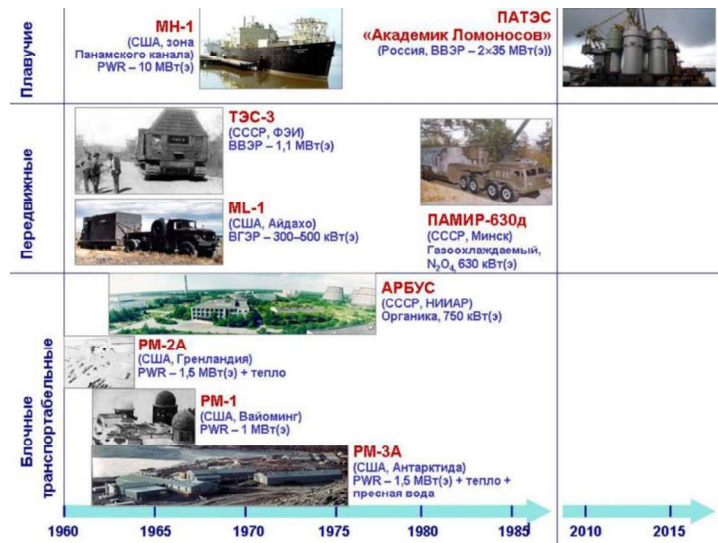


Рис. 1. Мобильные и блочно-транспортные АЭС мира

Упомянем также об опыте Курчатовского института по созданию энергоустановок на основе термоэлектрического прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. В 1962 году была создана первая в мире атомная термоэлектрическая установка "Ромашка" – наземный прототип бортового источника питания космического аппарата. В 1982 году в Курчатовском институте была создана и начала работу атомная термоэлектрическая установка "Гамма", предназначенная для экспериментальной отработки энергоустановок для объектов морской техники. В течение многолетнего периода был успешно выполнен полный цикл исследований и испытаний.

В середине 80-х годов, опираясь на успешный опыт испытаний установки "Гамма", в рамках конверсионных программ был разработан проект атомной электрической станции "Елена". Её технологическая схема базируется на трёх основных принципах:

- использование в качестве источника тепла водо-водяного реактора с саморегулированием мощности;
- применение для отвода тепла безнасосной схемы охлаждения (естественная циркуляция теплоносителя в первом и втором контурах);
- использование термоэлектрического метода преобразования тепловой энергии в электрическую.

Некоторым исключением из вышеприведённого ряда может рассматриваться Билибинская АТЭС (4 блока по 12 МВт(э)) с водо-графитовыми реакторами

(типа "первой в мире"). Они продолжают эксплуатироваться с 1974 года, но дальнейшей реализации идеи стационарной малой атомной станции по модели "большой" АЭС со строительством на месте не состоялось. Российский производитель ядерной электроэнергии – концерн "Росэнергоатом" – рассматривает АЭС на Чукотке с её низким использованием мощности и высоким "штатным" коэффициентом (количество персонала на единицу мощности), скорее, как "обременение" своей деятельности, чем как прототип для будущего.

Принципиальный вывод был сделан одним из ведущих российских ядерных специалистов В.А. Сидоренко: "Приходится констатировать, что проводившиеся в течение десятилетий многочисленные технико-экономические исследования, разработки различных конструктивных разновидностей ядерных реакторов для малой энергетики так и не продвинули распространение ядерных энергоисточников в этот, казалось бы, очевидный сектор потребителей... Анализируя причины такого торможения, можно было сделать вывод, что они находятся не в области принципиальных научно-технических и конструкторских решений, а в области организации, инфраструктуры эксплуатации и обслуживания, ответственности и владения ядерными установками, что формирует особые требования к квалификации и обеспечению безопасности" [4]. Как полагают специалисты, существо дела в том, что до сих пор не найдено соответствия между требованиями высокой квалификации персонала и обеспечения безопасности при эксплуатации ядерных объектов, организации инфраструктуры и обслуживания, с одной стороны, и интересами и возможностями потребителей децентрализованной энергии – с другой. У предлагаемой малой ядерной энергетики просто пока нет заказчика, готового её воспринять.

***Современное состояние и перспективы.*** Всплеск интереса к "вечной" теме атомных станций малой мощности, по крайней мере, на словах, наблюдается в мировом научном сообществе последние несколько лет. Для его характеристики вполне подходит заимствованное у классика определение "great expectations" ("большие ожидания"). Этот всплеск был подогрет, в частности, Министерством энергетики США, объявившим в 2012 году конкурс по финансированию проектов малых модульных реакторов в рамках государственной программы, призванной ускорить их коммерциализацию. В результате начали реализовываться около десятка проектов разных компаний, некоторые из которых могут войти в промышленную эксплуатацию после 2020 года. Всё это – стационарные установки в диапазоне мощности от 45 до 340 МВт(э). Аналогичный конкурс малых модульных реакторов запустило в 2016 году правительство Великобритании. Эксперты дружно пророчат малым реакторам перспективу коммерциализации даже в ядерной энергетике с реакторами большой мощности.

В табл. 1 представлены заимствованные из [1] зарубежные проекты малых

реакторов, которые, по оценке автора, могут претендовать на реализацию до 2030 года.

Таблица 1

*Перспективные зарубежные проекты малых модульных реакторов*

Проект	Мощность, МВт(э)	Тип	Разработчик	Страна	Статус
ACP100	100	PWR	CNNC	Китай	Базовый проект
DHR400	400 МВт(м) (тепло-снабжение)	ЛВР бассейн. типа	CNNC	Китай	Базовый проект
SMART	100	PWR	KAERI	Южная Корея	Сертифицированный проект
mPower	195×2	PWR	BWX Technologies	США	В разработке
NuScale	50×12	PWR	NuScale Power	США	В разработке
SMR-160	160	PWR	Holtec International	США	Предварительный проект
ACPR50S	60	PWR	CGNPC	Китай	Предварительный проект
GTHTTR300	300	ВТГР	IAEA	Япония	Базовый проект
A-HTR-100	50	ВТГР	Eskom Holdings SOC Ltd.	ЮАР	Концептуальный проект

Как видно, большинство проектов относится к реакторам с водой под давлением в диапазоне мощности от 50 до 200 МВт(э).

В России в 1990-х годах было принято принципиальное и имеющее долгосрочные последствия решение. Для реальной демонстрации достоинств ядерных энергоисточников в отдалённых изолированных регионах было сосредоточено внимание на создании атомной станции на плавучем средстве – барже, строящейся на заводе и возвращаемой от потребителя на завод для ремонта и замены топлива. Плавучий энергоблок (ПЭБ) "Академик Ломоносов" представляет собой новый класс мобильных источников энергии на базе российских технологий атомного судостроения. С морской точки зрения, это гладкопалубное (не имеющее надстроек на палубе надводного борта) несамоходное судно. Его длина – 144 м, ширина – около 40 м, водоизмещение – 21 тыс.т. В качестве ядерной установки была выбрана энергоустановка атомных ледоколов КЛТ-40, уже продемонстрировавшая высокий уровень надёжности и безопасности. Станция

оснащена двумя реакторными установками КЛТ-40С, которые способны вырабатывать 70 *MВт* электроэнергии в номинальном рабочем режиме. Кроме того, ПАТЭС может использоваться и в качестве опреснителя воды, выдавая в сутки до 240 *тыс.м<sup>3</sup>*, что в перспективе даст возможность использовать её и в южных широтах.

Строительство ПАТЭС началось в 2007 году и шло очень трудно – оно пережило смену завода-изготовителя, неоднократную смену первой площадки (Северодвинск, Вилючинск, Певек) и, может быть, наиболее неприятное – переработку проекта "на ходу" под низкообогащённое топливо. На конец 2018 года завершён первый этап буксировки ПЭБ из Санкт-Петербурга, где с 2009 года велось его сооружение, до места базирования – города Певек в Чукотском автономном округе. Преодолев 4000 *км* по водам четырёх морей – Балтийского, Северного, Норвежского и Баренцева, ПЭБ "Академик Ломоносов" пришвартовался в Мурманске. Ключевыми этапами 2018 года станут физический пуск реакторов и комплексные швартовные испытания. Затем ПЭБ с загруженным ядерным топливом будет доставлен из Мурманска в морской порт Певека.

К сожалению, вызванные переделкой активной зоны ограничения её энергозапаса и, соответственно, необходимый интервал между перегрузками ядерного топлива всего лишь в 2...3 года привели к установке на энергоблоке оборудования для перегрузки и хранения облучённого ядерного топлива. Это не соответствует важнейшему концептуальному требованию к перспективным плавучим станциям – отсутствию работ с ядерным топливом на месте эксплуатации. Перед разработчиками стоит задача обеспечить длительность кампании плавучих АЭС, позволяющую эксплуатировать их 10...12 лет без перегрузок топлива.

В настоящее время Росатом уже работает над вторым поколением ПАТЭС – оптимизированным плавучим энергоблоком, который будет меньше своего предшественника. Его предполагается оснастить реакторной установкой с двумя реакторами мощностью 50 *MВт* каждый (рис. 2).

Многие страны проявляли интерес к ПАТЭС ещё на стадии строительства, особенно активен в этом направлении Китай. В случае успешной работы ПАТЭС можно ожидать, что проект захотят реализовать страны, которым не под силу использование реакторных установок большой мощности, доминирующих сейчас на рынке, да и не нужны такие большие объёмы электроэнергии. Появление ПАТЭС малой мощности позволит раньше вступить в ядерный клуб большому числу стран.

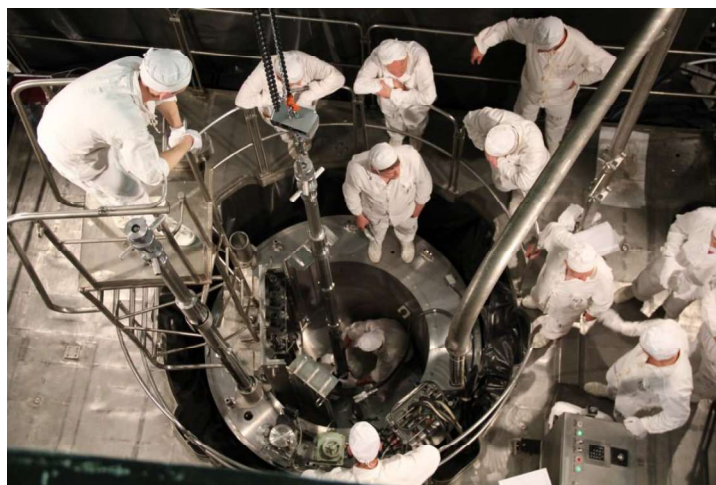


Рис. 2. Загрузка топлива в реактор ПАТЭС, 2018 год

Не оставляют надежд на включение в соревнование за рынок будущих малых АЭС и разработчики стационарных установок. Так, создатели мощного ряда ВВЭР уже предлагают интегральную реакторную установку ВВЭР-И в диапазоне мощностей 100, 200 и 300 *MВт*. "Изюминка" разработки – возможность осуществления естественной циркуляции теплоносителя и, соответственно, высокий уровень безопасности, а также компактность оборудования, обеспечивающая модульный принцип устройства АЭС.

В качестве самостоятельного класса атомных станций малой мощности можно выделить уже упоминавшиеся установки с мощностным диапазоном 0,5...1 *MВт(э)* (5...10 *MВт* тепловых), которые можно создать на базе необслуживаемых саморегулируемых станций с термоэлектрическим преобразованием энергии.

В последние годы этим работам был придан мощный побудительный импульс. Он, конечно, формируется стратегической проблемой энергообеспечения объектов гражданского и военного назначения в труднодоступных районах страны и, прежде всего, "арктическим вектором" энергетики России [5]. Как пишет президент НИЦ "Курчатовский институт" М.В. Ковальчук, "у Арктики есть своя специфика — рассредоточенность населённых пунктов (иногда они удалены друг от друга на сотни километров) и их слабая энергообеспеченность. Энергопотребление большинства таких посёлков невелико, поэтому экономически и технологически нецелесообразно подключать их к крупным генерирующим комплексам. В этих условиях нужна распределённая система энергоснабжения, при создании и функционировании которой должны учитываться экстремальные условия эксплуатации, в первую очередь климатические, невысокая плотность населения и, следовательно, дефицит обслуживающего персонала. Кроме того,



существуют повышенные риски, связанные с низкой устойчивостью экологических систем, которые определяют биологическое равновесие и климат Земли, и их зависимость даже от незначительных антропогенных воздействий... Здесь эффективен и важен практический опыт применения российских судовых ядерных технологий".

Действительно, у российских конструкторов атомной техники накоплен значительный опыт разработки и эксплуатации корабельных реакторных установок для ВМФ и атомных гражданских судов. В табл. 2 [6] представлены данные о проектах ведущих конструкторских организаций страны, разработанных на основе опыта по установкам этого назначения в диапазоне мощностей от 6 до 600 МВт.

Таблица 2

*Проекты реакторных установок в стадии разработки*

Проект	Тип реактора	Мощность тепловая / электрическая, МВт	Интервал между перегрузками, лет	Стадия разработки
<b>Особое конструкторское бюро машиностроения "Африкантов" (ОКБМ)</b>				
АБВ-6Е	Интегральный PWR	38 / 6–9	10–12	Технический проект ПАТЭС. Эксплуатируется наземный стенд-прототип
КЛТ-40С	Интегральный PWR	150 / 35	2,5–3	Установлены на ПАТЭС "Академик Ломоносов"
РИТМ-200М	Интегральный PWR	170 / 50	5	Установлены на строящихся ледоколах пр. 22220
ВБЭР-300	Интегральный PWR	917 / 325	6	Технический проект
<b>Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала (НИКИЭТ)</b>				
Шельф	Интегральный PWR	28,4 / 6,6	6	Концептуальный проект. Детальный проект разрабатывается
УниTERM	PWR	30 / 6,6	20–25	Концептуальный проект
Карат	BWR	180 / 45	7	Концептуальный проект. Детальный проект разрабатывается

Ещё в конце 1980-х годов в СССР была разработана концепция создания

подводных атомных станций с реакторными установками малой мощности [7]. Проектные предложения ведущих российских конструкторских организаций по техническим объектам с ядерными энергетическими установками для освоения морских нефтегазовых месторождений в ледовых условиях включают подводные танкеры, атомные подводные газоперекачивающие станции, подводные комплексы для производства сжиженного природного газа, атомные подводные буровые суда.

По мнению разработчиков, атомное энергообеспечение подводно-подлёдных нефтегазовых промыслов на Арктическом шельфе должно планироваться и осуществляться на основе системного подхода к организации их жизненного цикла, базируясь на принципе “made in factory and shipped to sites”, с максимальным использованием многолетнего опыта эксплуатации атомных судовых технологий, что позволит обеспечить:

- отсутствие каких-либо выбросов в атмосферу, локализацию теплового воздействия на воды Северного Ледовитого океана и его минимизацию до величин, несопоставимо малых в сравнении с естественными колебаниями температур;
- сокращение вероятности разливов нефти во льдах, для ликвидации которых сегодня нет эффективных технологий;
- высокую надёжность и безопасность энергоустановок;
- минимальное обслуживание вплоть до полной автономности;
- эффективную и безопасную эксплуатацию в подводно-подлёдных условиях на удалении от берега до 1000 км и более.

Всё это пока остаётся на “листе ожидания”, однако реализуемая в настоящее время государственная политика в отношении арктического региона и накопленный научно-технический опыт позволяют обоснованно предполагать существенное продвижение в разработке ядерных энергетических установок для Арктики уже в ближнесрочной перспективе.

### Литература

1. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2018 Edition. A supplement to IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS). <http://aris.iaea.org>.
2. **Marcus Gail H.** Nuclear Firsts Milestones on the Road to Nuclear Power Development.- American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, USA, 2010.
3. **Гагаринский А.Ю., Яцишина Е.Б.** Курчатовские реакторы / НИЦ «Курчатовский институт».- М., 2017.
4. История атомной энергетики Советского Союза и России / **Под ред. В.А. Сидоренко.** Выпуск 5: История малой атомной энергетики.- М.: ИздАт, 2004.
5. **Ковальчук М.В.** Арктический вектор энергетики России // Природа.- 2016.

6. **Gagarinskiy A.** Russian Nuclear Energy Technologies for the Development of the Arctic // ATW, International Journal for Nuclear Power.- March 2018.
7. Атомная энергетика для арктического шельфа / **Е.П. Велихов и др.** // В мире науки.- 2015.- № 10.

*Поступила в редакцию 16.10.2018.  
Принята к опубликованию 14.12.2018.*

## **ՓՈՔՐ ՀՁՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՌԵԱԿՏՈՐՆԵՐ. ՄԵԾ ՄՊԱՍՈՒՄՆԵՐ**

### **Ա.Յու. Գագարինսկի**

Փոքր հզորությամբ միջուկային տեղակայանքները դարձել են ատոմային տեխնիկայի անբաժանելի մասը մարդկային գործունեության երկու բնագավառներում. դրանց վրա են հիմնված ատոմային նավատորմերը և գիտության ու ուսուցման համար նախատեսված հետազոտական ռեակտորները, որոնք լայն տարածում են գտել 10-յակ երկրներում և հիմնական վարժանքային բազա են նոր մասնագետների պատրաստման համար: Պետք է նշել, սակայն, որ փոքր հզորությամբ ատոմային կայանները և էներգիայի ավանդական աղբյուրների համեմատ նրանց ակնհայտ առավելությունները դժվարհասանելի տարածքներում, չնայած մշակողների մեծ ձգտումներին և հիմնավոր հույսերին, առայժմ չեն դարձել էներգետիկայի ծայրակշիռ ուղղություն: Այդուհանդերձ, համաշխարհային գիտական հասարակության շրջանում վերջին մի քանի տարիներին նկատվում է հետաքրքրություն փոքր հզորությամբ ատոմային կայանների «հավերժական» թեմայի նկատմամբ: Փորձագետները միաձայն կանխագուշակում են այս ուղղության առևտրայնացման հեռանկարը մոտակա տարիներին: Ընդհանուր առմամբ, իրավիճակը լավ է բնութագրում դասական «մեծ սպասումներ» տերմինը:

Այս ակնարկում համառոտ ներկայացվում է ստացիոնար և տեղափոխվող էներգետիկայի համար նախատեսված փոքր ռեակտորների ուղղության զարգացման պատմությունը: Քննարկվում են աշխարհում և Ռուսաստանում փոքր հզորությամբ ատոմային կայանների ժամանակակից իրավիճակն ու հեռանկարները:

**Առանցքային բաներ.** միջուկային ռեակտորներ, փոքր հզորությամբ ատոմային կայաններ, ստացիոնարներ, շարժուններ, բլոկատեղափոխելի միջուկային տեղակայանքներ, լողացող ատոմային էլեկտրակայան:

## **SMALL – POWER NUCLEAR REACTORS – GREAT EXPECTATIONS**

### **A.Yu. Gagarinsky**

Small power nuclear plants have become an integral part of nuclear equipment in two large areas of human activity: namely, nuclear fleet and research reactors for science and education which are widely spread in many countries, and a basis for the new personnel training in nuclear

states. However, despite their developers' motivation and justified hopes, and despite their obvious advantages compared to conventional sources, especially in hard accessible regions, small modular reactors (SMRs) still play no considerable role in the energy industry. Nevertheless, in recent years, the international scientific community demonstrates an increasing interest in the "eternal" subject of SMRs. Experts unanimously forecast SMR commercialization in the next few years. On the whole, the classical term "great expectations" describes this situation very well.

The given paper gives a brief review of small reactor development for both stationary and transportable NPPs, and discusses the small power nuclear plant status and prospects in Russia and in the world.

**Keywords:** nuclear reactors; small modular reactors, stationary, mobile, transportable nuclear facilities, floating nuclear power plant.