



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Аналитическое исследование ЦАИР «Технологические и экономические аспекты проектов атомных станций малой мощности (АСММ)»

ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации»

13 октября 2022 г.

Краткая информация о ЦАИР



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Дата создания: сентябрь 2019 года.



Цель: содействие научному, аналитическому и информационному развитию организаций ГК «Росатом».

Соответствует основной цели ЧУ «НИИ», указанной в п.1.1 Устава организации.



Положение о ЦАИР: утверждено приказом ЧУ «НИИ» от 05.04.2021 № 774/68-П.



План деятельности: проект плана готовится директором ЦАИР и утверждается директором ЧУ «НИИ». План на 2022 г. утвержден 24.01.2022 и успешно реализуется.

СТРУКТУРА ЦАИР



ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ЦАИР



Портал ЦАИР:

<https://ukss.rosatom.local/sites/cair/>



Раздел ЦАИР на портале «Страна Росатом»:

<https://strana.rosatom.local/NuclearIndustry/cair/>



Портал ПС ТЭМ:

<https://ukssm.rosatom.ru/sites/nii-tem>

Тематические аналитические отчеты ЦАИР



Ежегодно эксперты ЦАИР готовят **тематические аналитические отчеты** по ключевым направлениям деятельности ГК «Росатом».



Цель – информационно-аналитическое обеспечение руководства и экспертного сообщества ГК «Росатом».



Отчеты рецензируются экспертами, обсуждаются на отраслевых слушаниях, депонируются и издаются в печатном виде (тираж – 100-150 экземпляров).

25

тематических отчетов подготовлено ЦАИР на текущий момент.



Рекомендуется расширение тиража в формате «Библиотечки ЦАИР».



Атомные станции малой мощности (отчёт 2019 г.)



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

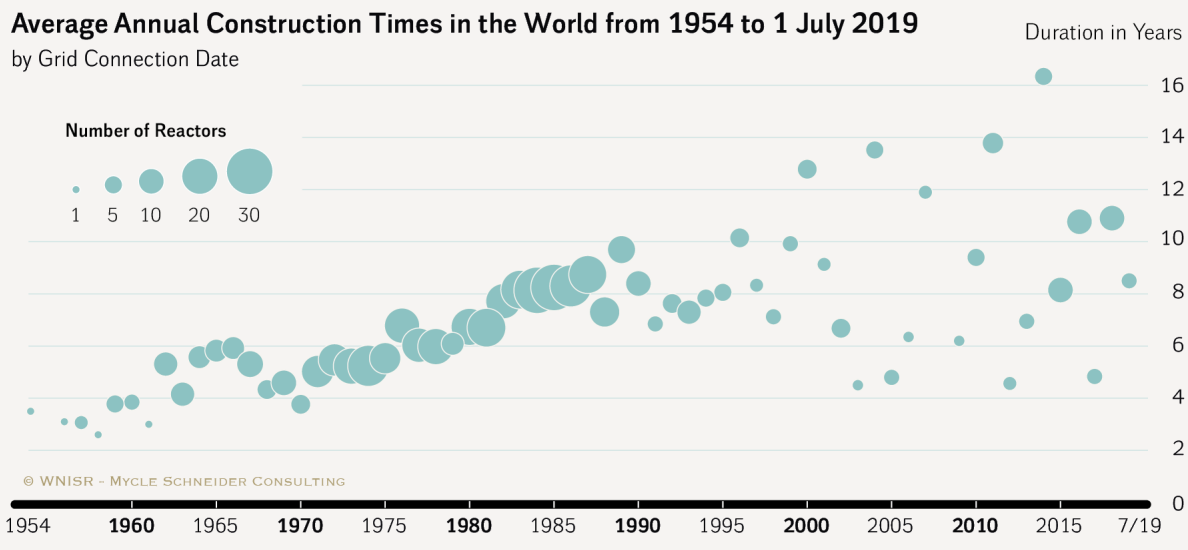
ЦАИР проведены аналитические исследования АСММ, подготовлен и издан отчёт (2019 г.), содержащий:

- статистический анализ 54 зарубежных и 38 отечественных проектов АСММ по параметрам: мощности, применяемой реакторной технологии, уровню технологической готовности и разработчику (вендору);
- оценку **влияния эффектов масштаба, серийности и реакторной технологии** на экономические характеристики АСММ;
- требования к АСММ потенциальных рынков (с разделением их на «Сетевой» и «Внесетевой» сегменты);
- предварительную **многокритериальную оценку перспектив АСММ** на базе различных технологий.

В отчёте показаны **отставание отечественных проектов** от зарубежных в оптимизации компоновки комплектной АСММ, несмотря на широкий спектр предлагаемых РУ, и необходимость подхода на основе анализа множества аспектов, связанных как с технической стороной проектов, так и с экономикой.

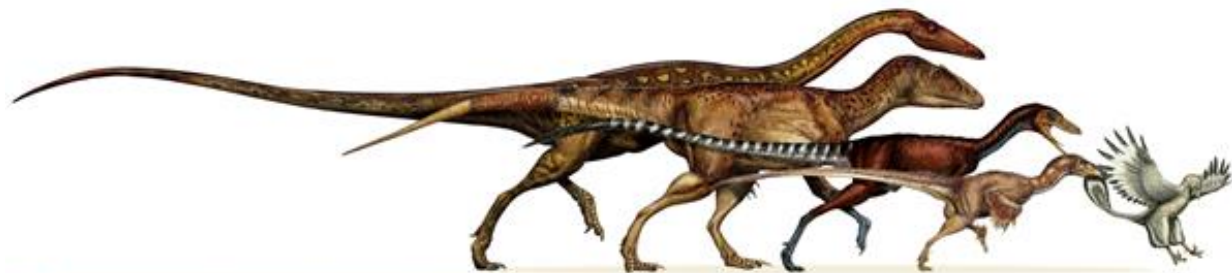


АСММ – средство снижения рисков проектов атомной энергетики

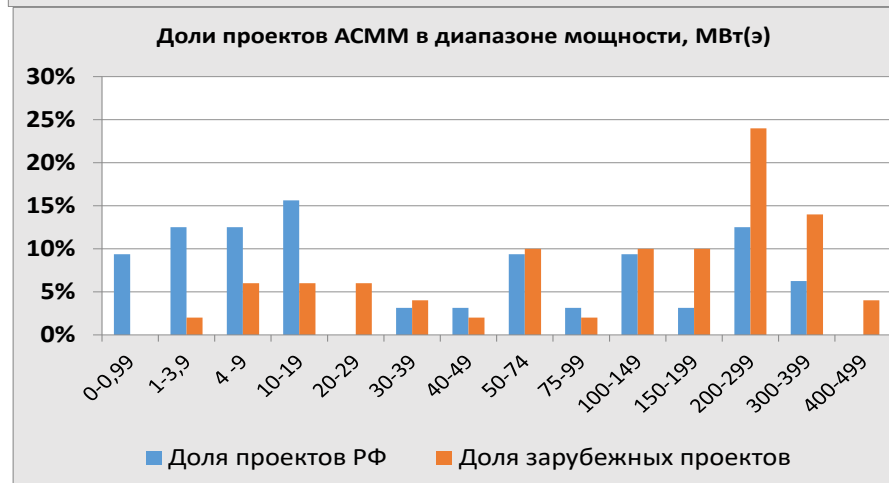
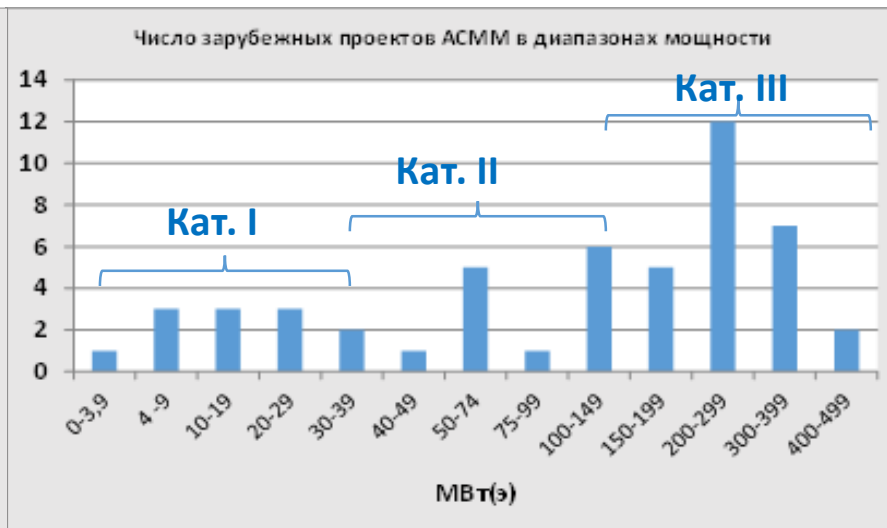
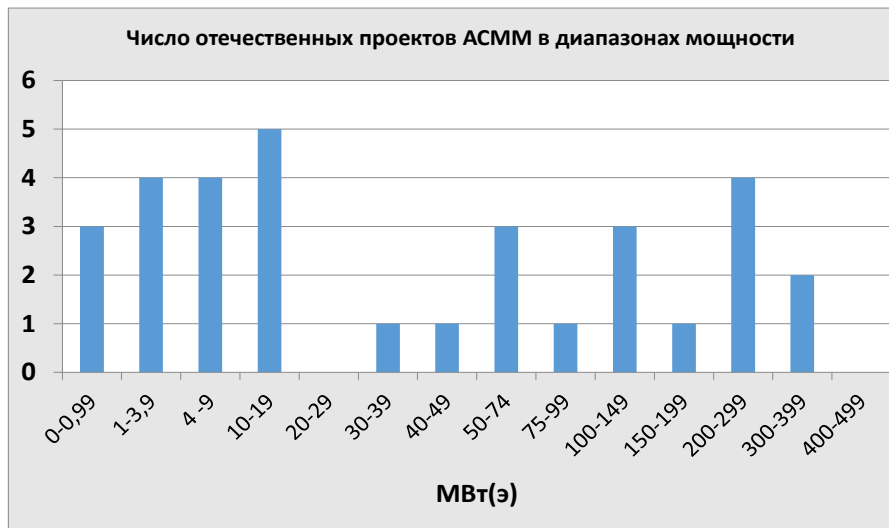


Помимо роста сроков сооружения энергоблоков АЭС (примерно на 3 года за 20 лет), налицо растущая «турбулентность» - неопределённость сроков сооружения, т.е. риск.

Возможная эволюция АЭС (по подобию эволюции в животном мире) – от «крупных видов» к более «мелким».



Распределение проектов АСММ по мощности



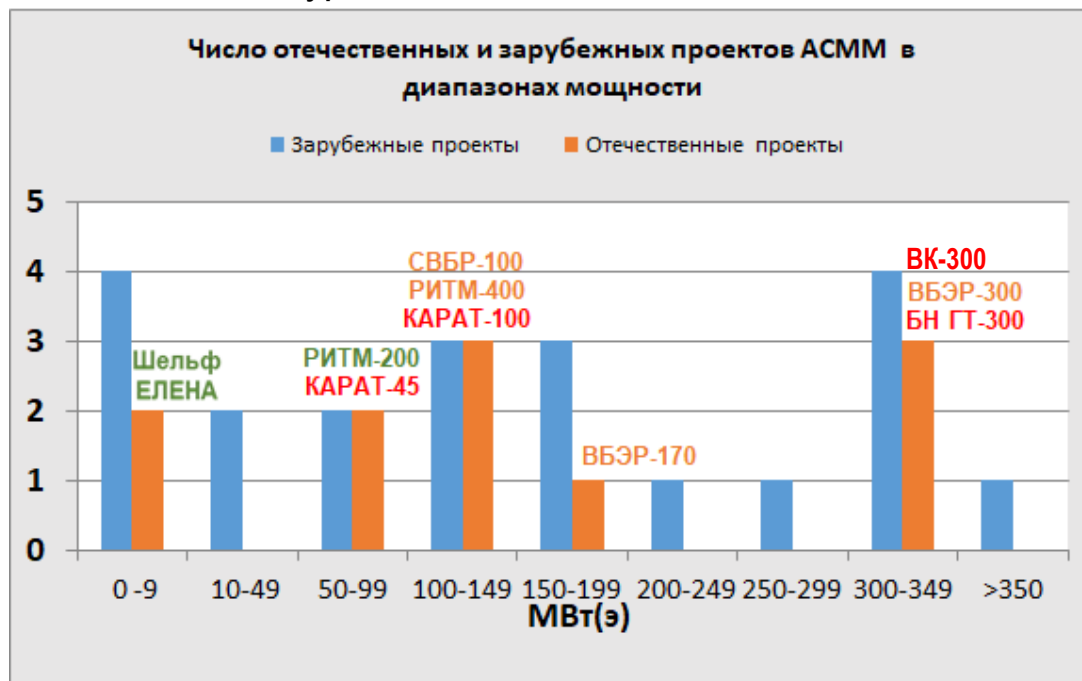
- Категория I: малые установки для энерго-снабжения изолированных объектов
- Категория II: многомодульные установки, конкурирующие с газовой генерацией за счёт эффекта серийности
- Категория III: блочные крупные АСММ с расчётом на снижение CAPEX за счёт интегральной компоновки

Максимум распределения отечественных проектов АСММ по мощности находится в области 1 – 20 МВт(э) (в главном фокусе проблема энергоснабжения Крайнего Севера).

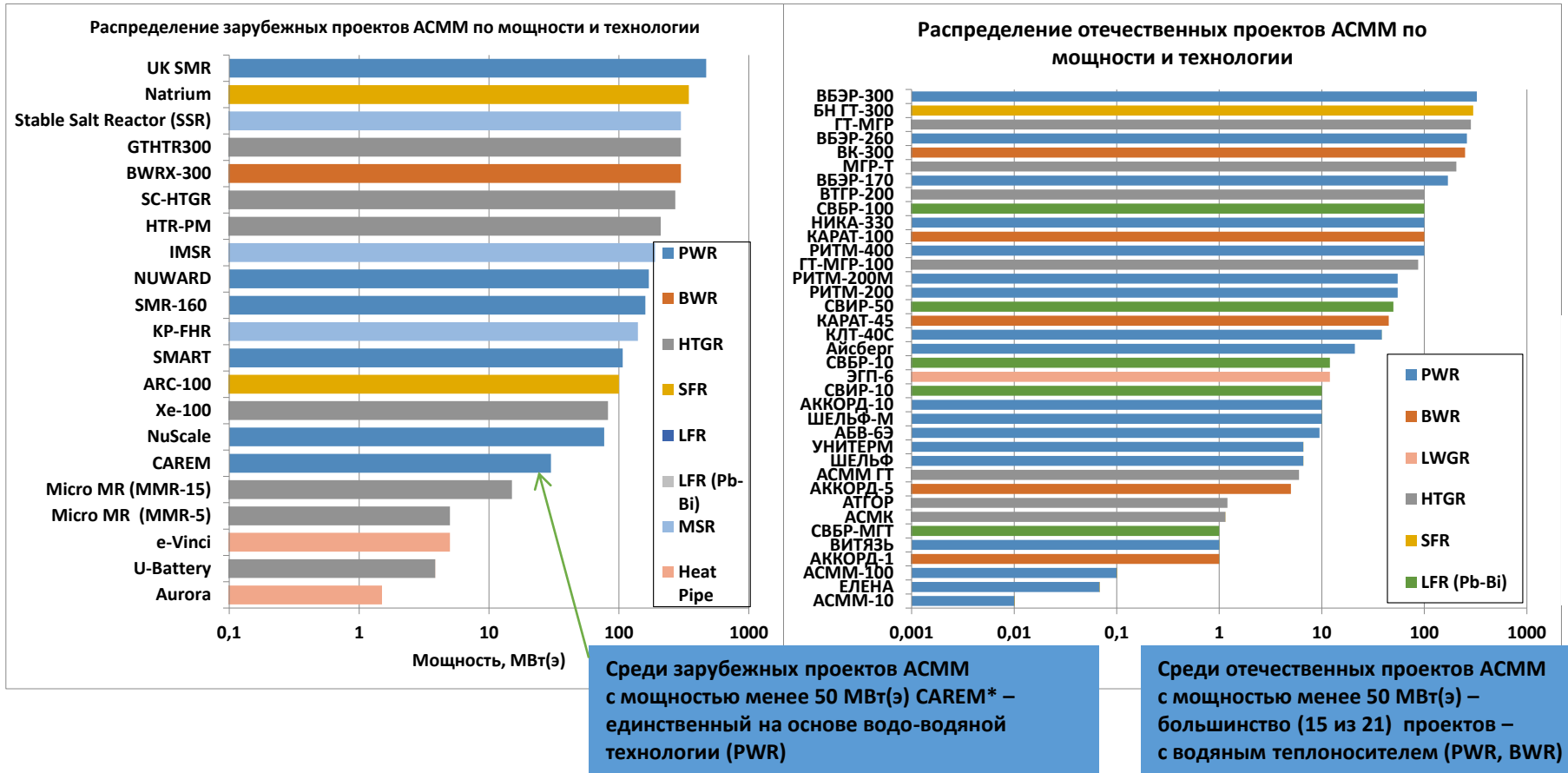
В то же время, по сравнению с зарубежными проектами, наблюдается недостаток проектов мощностью 100-200 МВт.

Диапазон мощности РУ АСММ

- Диапазон мощности **зависит от рассматриваемого рынка** – «сетевого» или «несетевого» и определяется применительно к конкретному заказчику.
- Для «сетевого» рынка желательна мощность модуля АСММ не менее 100 МВт(э) (а лучше 150-200 МВт(э)) при «объёме рынка» не менее 1200-2400 МВт(э) – при таком условии эффект серийности может компенсировать эффект масштаба.
- Из существующих в РФ проектов АСММ к указанному диапазону мощности можно отнести только проект СВБР-100, а также проекты РИТМ-400, ВБЭР-170, ВБЭР-300 («ОКБМ Африкантов»), КАРАТ-100 (АО НИКИЭТ) и БН ГТ 300 (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), находящиеся на более низких уровнях готовности.



Распределение проектов АСММ по мощности и технологиям



Статистический анализ проектов АСММ по мощности и технологии подтверждает теоретический вывод о том, что АСММ на основе водо-водяной технологии (прежде всего, PWR) не могут дать желаемую экономическую эффективность при мощности менее 50 МВт(э)

*Проект CAREM представляет собой прототип для последующего масштабирования

Требования заказчиков к проектам АСММ на «Внесетевом» и «Сетевом» рынках

Параметр	«Внесетевой рынок»: энергоснабжение изолированных объектов	«Сетевой рынок»: централизованная генерация в средних и крупных сетях
LCOE (при WACC=5%), \$/МВтч	<p>≤ 100</p> <p>Вследствие конкуренции с: Дизельной генерацией ~ 400-700¹; ВИЭ ~ 150-200¹ для суровых условий; СПГ ~ 90 – 150¹ (с учётом транспортировки).</p>	<p>≤ 50</p> <p>Вследствие конкуренции с: углём с улавливанием CO₂: ~ 90-125²; газом (ПГУ, комбинированный цикл): ~ 40 – 55 (75 с улавливанием CO₂)²; ГТУ: ~ 70-100²; АЭС большой мощности: ~ 75-80²; ВЭС прибрежная: ~40-70²; СЭС: ~40-110².</p>
Мощность модуля АСММ	<p>~ 30-50 МВт; До 4-5 модулей на площадке.</p>	<p>~ 100-200 МВт; До 10-12 модулей на площадке для замены угольных ТЭЦ и как альтернатива большим АЭС.</p>
Применения	<ol style="list-style-type: none"> 1. Коммунальное тепло 2. Электроэнергия 3. Опреснение воды 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Электроэнергия 2. Опреснение воды 3. Коммунальное тепло 4. Промышленное тепло
Load following	<p>100-30-100% за 24 часа, иначе будет необходима поддержка ДЭС/накопителем с увеличением LCOE.</p>	<p>100-50-100% в сетях с наличием резервных мощностей.</p>
Fuel cycle	<p>Частота перегрузок 1 раз в 5 и более лет с централизованным сервисом со стороны поставщика на площадке.</p>	<p>Частота перегрузок 1 раз в 12 – 24 месяцев силами оператора АЭС.</p>

Требования потенциальных рынков к АСММ (предварительная оценка)



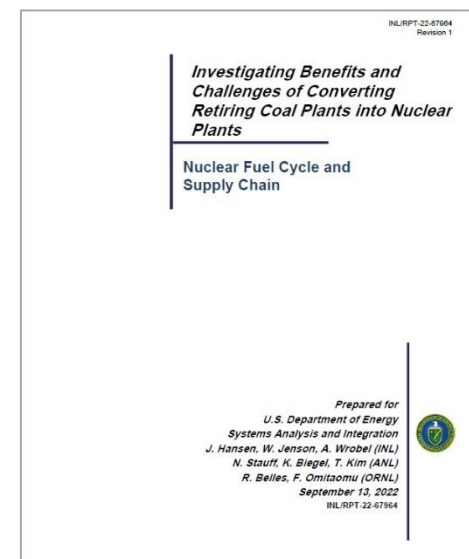
Рынок замещения угольной генерации в рамках курса на декарбонизацию генерации. Оценка объёма рынка замещения блоков угольных ТЭС (для установок до 600 МВт): в Индии – \$30-40 млрд, в Индонезии – \$25-30 млрд.

Предварительные условия:

- широкое распределение мощности некрупных ТЭС со средней мощностью 600-660 МВт;
- возможна плотная застройка вокруг и узкая зона безопасности в 300 метров и менее;
- ценовая конкуренция с газовой генерацией с LCOE от \$50 (без улавливания CO₂) до \$90 (с улавливанием) /МВтч;
- необходимость частичного вывода из эксплуатации ТЭС, в т.ч., разрушение зданий;
- сети привычны к уровню манёвренности угольной ТЭС.

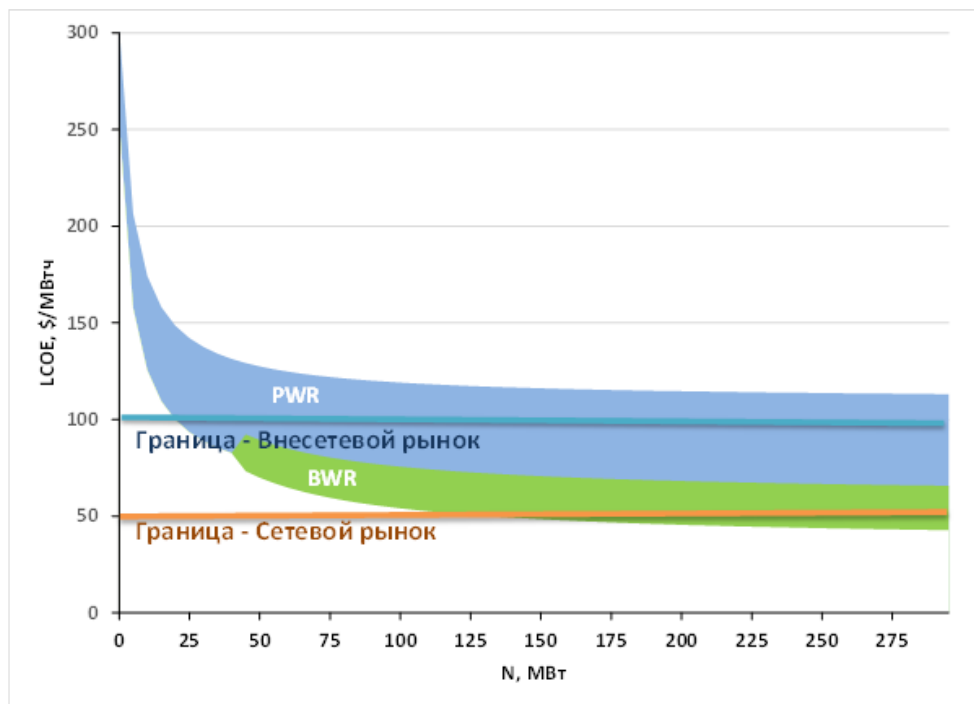
Требования к АСММ:

- мощность модуля: 150-300 МВт(э);
- масштабируемость: от 2 до 4 модулей с общей инфраструктурой;
- зона планирования защитных мероприятий ≤300 метров;
- маневренность: не менее 100-40-100 % за 24 часа с набором ~1% в минуту
- когенерация (электрическая и тепловая энергия);
- встраиваемость: желателен минимальный объём работ по демонтажу угольной ТЭС;
- топливо и перегрузки: НОУ <5% или HALEU желательно в 24+ месячном цикле, на площадке.



Эффект масштаба – зависимость LCOE от мощности для водо-водяных реакторных технологий (PWR vs. BWR)

- Конкурентоспособность АСММ с реакторами с водой под давлением на «сетевом» рынке ограничена, поскольку даже при максимальной для АСММ мощности 300 МВт(э) не достигается целевой уровень LCOE в 50 \$/МВтч(э), желательный для успешной конкуренции с другими видами генерации.
- Напротив, у технологии BWR имеется потенциал соответствия требованиям « сетевого » рынка по LCOE, начиная с мощности модуля порядка 150 МВт. Несмотря на успешный опыт эксплуатации ВК-50 в НИИАР, текущий уровень готовности отечественных проектов «кипящих» корпусных реакторов, разработку которых вёл НИКИЭТ, является неопределённым.

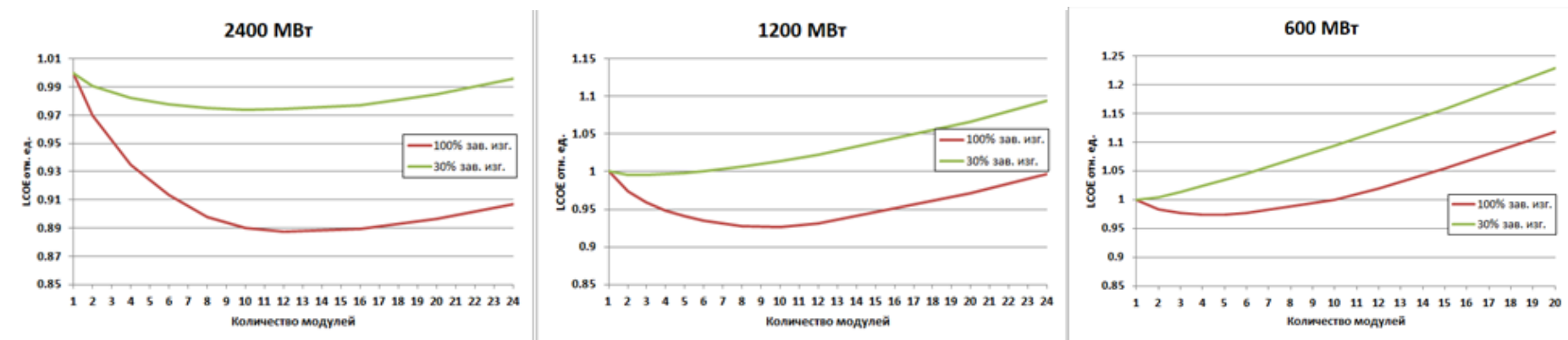


Оптимизация между эффектами масштаба и серийности

Согласно исследованию Национальной ядерной лаборатории (NNL) Великобритании (со ссылкой на оценки АО «ОКБМ Африкантов»), CAPEX РУ АСММ снижается на 10% при каждом удвоении серии произведённых модулей.

Доля общего CAPEX, для которого возможно снижение (~30%) соответствует доле затрат заводского производства в CAPEX АСММ. В совместном исследовании NNL и Ernst & Jung доля заводского производства в CAPEX АСММ оценивается в 45-60%.

По оценкам NEL эффект серийности проявляется также, но в меньшей мере в отношении остающихся ~70% CAPEX за счёт применения «продвинутых строительных технологий на площадке и автоматизации работ.

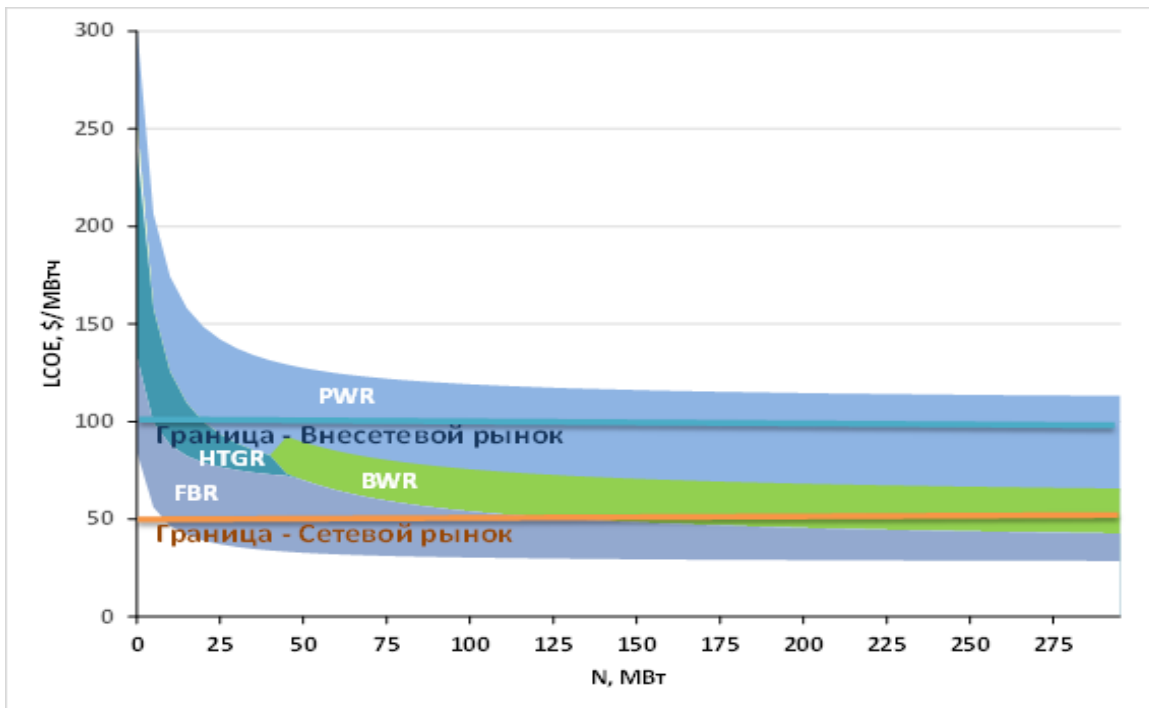


Оптимум по LCOE для «Сетевого» рынка достигается при мощности модуля АСММ (PWR) 120-240 МВт в зависимости от объёма доступного рынка.

Переход на перспективные технологии

Исследование АСММ ЦАИР показало:

- наибольший потенциал снижения LCOE имеют быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем (Na, Pb/Bi);
- ВТГР с циклом Брайтона имеют определённый потенциал снижения LCOE, но их внедрение требует глубоких НИОКР.



Атомная энергия

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ,
ЯДЕРНОГО ОБЩЕСТВА И РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Издается с мая 1956 г.

ТОМ 73, ВЫП. 1, ИЮЛЬ 1992

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР Н.Н. ПОНАМАРЕВ-СТЕПНОЙ
РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: А.А. АВАГЯН, Е.О. АДАМОВ, Р.М. АЛЕКСАХИН,
Н.С. БАБАЕВ, Л.А. БОЛЬШОВ, Н.И. ЕРМАКОВ, Б.И. ИЛЬИЧЕВ, О.Д. КАЗАЧКОВСКИЙ
(заместитель главного редактора), П.Л. КИРИЛЛОВ, Ю.И. КОРЯКИН, А.Л. ЛАПШИН,
В.В. МАТВЕЕВ, А.С. ПОЛЯКОВ, Е.П. РЯЗАНЦЕВ, О.Б. САМОЙЛОВ, В.А. СИДОРЕНКО,
И.С. СЛЕСАРЬ, М.И. СОЛОНИН, М.Ф. ТРОЯНОВ, Г.А. ФИЛИППОВ, И.В. ЧУВИЛО, В.А. ЧУЯНОВ,
А.В. ШАЛЬНОВ, В.В. ШАТАЛОВ, А.С. ШТАНЬ, В.С. ЮЗГИН (заместитель главного редактора)

В НОМЕРЕ

<p>3-Я ЕЖЕГОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯДЕРНОГО ОБЩЕСТВА «ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАВТРАШНЕМ МИРЕ»</p> <p>Сидоренко В.А. Будущее ядерной энергетики Российской Федерации 3</p> <p>Митяев Ф.М., Антоновский Г.М., Ку- зуль В.С., Панов Ю.К., Самойлов О.Б., Фле- ров Л.Н., Понамарев-Степной Н.Н., Кухар- кин Н.Е., Никифоров Ю.Г. Энергетический реактор повышенной безопасности ВВЭР-600 для АС нового поколения 6</p> <p>Митяев Ю.И., Токарев Ю.И., Соколов И.Н., Пахч Э.Э., Абрамов В.И. АС нового поколе- ния с корпусным катитидом реактором повы- шенной безопасности 13</p> <p>Громов Б.Ф., Субботин В.И., Тошинский Г.И. Применение расплавов эвтектики свинец— висмут и сннца в качестве теплоносителя ЯЭУ 19</p> <p>Коровин Ю.А., Артисюк В.В., Конобева А.Ю. Библиотеки сечений для исследования ради- ационной повреждаемости, активации и трансмутации материалов, облучаемых час- тицами высокой энергии 24</p> <p>Кудрицкий Ю.К., Георгиевский А.Б., Кар- пов В.И. Адаптивная гипотеза биологи- ческой эффективности ионизирующего из- лучения 27</p> <p>Павлюкья Ф.И., Горченкова Т.А., Емелья- нов В.В., Федорова З.М., Мисосов Б.Ф. Поведение ²³⁹Pu в почвах на следе после аварии на Южном Урале в 1957 г. 32</p>	<p>Экспериментальное обоснование безопасно- сти АСТ-500 на крупномасштабной модели реактора 37</p> <p>Адамов Е.О., Ганев И.Х., Орлов В.В. Достиже- ние радиационной эквивалентности при об- ращении с радиоактивными отходами ядер- ной энергетики 44</p> <p>Паранюшкин В.С., Петров В.Н. Критерии оценки эффективности барьеров безопасно- сти ядерных реакторов 51</p> <p>Шмырев Ю.В., Деревянкин А.А., Токмачев Г.В. Вероятностное моделирование аварийных последствий для АЭС с ВВЭР-440 54</p> <p>Васильева Р.В., Епуркин В.М., Летинский Ю.А., Карасев В.В., Новосельский О.Ю., Сафо- нов В.К., Ососкин Г.В. Модернизация инту- рикорпусных устройств сепараторов пара как один из способов повышения безопасно- сти РБМК-1000 60</p> <p>Коренков А.П. Основные положения по оценке надежности захоронения отвержденных ра- диоактивных отходов 65</p> <p>Рефераты публикуемых статей 36, 70, 84</p>
---	--

ИНФОРМАЦИЯ

Международная конференция WANO по водо-
химическому режиму двухконтурных АЭС (71). совеща-
ние Подгруппы по принципам и критериям при
удалении радиоактивных отходов (75). 3-я школа-
семинар по полупроводниковым детекторам ионизи-
рующего излучения (78). Новые книги, (80).

РЕКЛАМА

ФЗИ: Труды международного семинара «Теплофи-
зика-90» (83). Фирма BASK Ltd: Комплекты меди-
цинских экологически чистых швейных изде-
лий (83).

СТАТЬИ

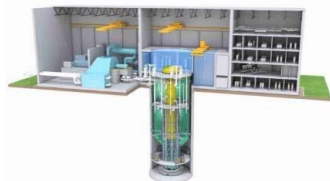
Бабкина А.С., Балунов Б.Ф., Живницкая Т.С.,
Кууль В.С., Носатов В.Н., Фальков А.А.

Уровень готовности реакторных технологий АСММ

- Из проектов АСММ на основе «неводных» технологий в РФ на наиболее высоком уровне готовности находится проект СВБР-100 (эскизный проект ОПЭБ). Однако текущий уровень готовности проекта требует уточнения.
- Высокий уровень готовности имеет технология реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-600, 800, 1200). ФЭИ предлагалась концепция АСММ с использованием технологии БН и газотурбинным преобразованием энергии БН ГТ.
- Ведётся сооружение реактора со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300, проектируется БР-1200.
- Проектирование ВТГР в РФ осуществляется с целью применения для производства водорода.
- Конкуренты на рынке АСММ рассчитывают получить референтность к 2028 г., на уровне государств (США, Канада, Великобритания, Франция) реализуются отдельные программы по поддержке разрабатываемых проектов АСММ с «неводными» реакторами.



Natrium (TerraPower), РБН, 345 МВт(э) – планируется сооружение в США в 2028 году



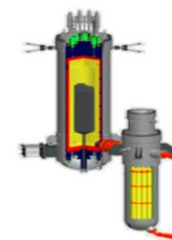
BWRX-300 (GE-Hitachi), BWR, 300 МВт(э) - выбран канадской энергокомпанией OPG для сооружения новых блоков АЭС Дарлингтон



К 2028 году (или раньше) можно ожидать сооружение первой АСММ **NuScale** (PWR)



Xe-100 (X-Energy), HTGR, 80 МВт(э) – активная работа по созданию FOAK реактора в Канаде к концу 2020 гг.



HTR-PM (КНР), HTGR – осуществлён физ. пуск

ГК «Росатом» рассчитывает к 2028 г. завершить сооружение в Якутии АСММ РИТМ-200 (2*55 МВт).

- 1 | Необходимость выработки комплексного набора критериев** для сравнения различных проектов АСММ между собой.
- 2 | Необходимость выработки комплексного набора требований к АСММ** применительно к «Внесетовому» и «Сетевому» рынкам, возможно, с детализацией требований по уровням мощности во всём диапазоне мощностей АСММ.
- 3 | Отставание отечественных разработчиков в проектировании комплектных АСММ** (на уровень разработки эскизного или «обликового» проекта комплектной АСММ в России выведен только наземный РИТМ-200 и, возможно, СВБР-100), в то время как заказчику интересен полностью спроектированный комплектный объект, а не РУ; адекватно оценить экономические параметры и обосновать безопасность можно только в отношении комплектной АСММ, а не РУ.
- 4 | Необходимость совместной проработки конструкторов и проектировщиков АСММ с Ростехнадзором возможности разработки нормативов по безопасности**, основанных на масштабировании вниз соразмерно мощности, объёму ядерных материалов, радиационной нагрузке, требований к системам безопасности и радиусу зоны планирования защитных мероприятий, для их дальнейшего утверждения.

- 5** | **Наличие** развитых отечественных проектов РУ АСММ **в двух мощностных диапазонах:**
 - в диапазоне ~10 МВт благодаря наличию проектов Шельф-М и др.;
 - в диапазоне ~50 МВт уже имеется РИТМ-200, но для зарубежных рынков желательна модификация с НОУ обогащением $\leq 4,95\%$ по U-235.
- 6** | Одновременно приходится констатировать **отсутствие развитого отечественного проекта АСММ в весьма востребованном диапазоне 100-150 МВт(э), за возможным исключением СВБР-100.**
- 7** | **Проведённый** анализ показывает, что LCOE названных выше проектов АСММ находится на актуальной границе конкурентоспособности с другими видами генерации. Поскольку в дальнейшем конкуренция будет усиливаться, следует обратить внимание на **потенциал иных, по сравнению с PWR, реакторных технологий (прежде всего, FBR), особенно сильно проявляющийся в диапазоне мощностей ниже 50 МВт для «Внесетевого» рынка и во всём диапазоне мощностей АСММ – для «Сетевого» рынка.**
- 8** | Таким образом, **концентрация на двух проектах (Шельф-М и РИТМ-200) сужает возможные рынки** для отечественных АСММ в будущем.
- 9** | Необходимо рассмотреть возможность предложения **продукта на основе РУ АСММ, ориентированного на целевое применение для конкретных технологических процессов.**



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Благодарю за внимание!

Журавлёв Илья Борисович

Руководитель группы приоритетных направлений НТР
Центра аналитических исследований и разработок (ЦАИР)

Тел.: +7 (499) 558 10 25, доб. 6568

Моб. тел.: +7 (916) 619 56 85

E-mail: ibozhuravlev@rosatom.ru

www.rosatom.ru