

# Направления развития АСММ

## Преимущества малых АЭС в изолированных и труднодоступных территориях (ИТТ)



## Удельный расход условного топлива на генерирующих объектах в ИТТ



Цель: Эффективный источник энергии для обслуживания/развития инфраструктуры Северного морского пути и нужд МО РФ, активных энергетических комплексов (вне структуры ЭЭС), развития труднодоступных регионов

# Параметры проектов АСММ зарубежного дизайна

АСММ	Нэл. (МВт) / Нт. (МВт)	$P_1$ (МПа) / $T_1$ (°C)	$P_2$ (МПа) / $T_2$ (°C)	Рконт. (МПа)	CDF 1 / р.*год	LRF 1 / р.*год	Сейсмика	Циркул.
CAREM IPWR, Аргентина	~30 / 100	12,25 / 284-326	4.7 / -	0,5	$10^{-7}$	-	0,25 g	NC
Nu Scale IPWR, США	50 / 160	12,8 / 310	3,4/306	5,5	$10^{-8}$	-	0,5 g	NC
АСРР50S петлев. PWR, КНР	60 / 200	15,5 / 299-322	-	1,4	$10^{-6}$	$10^{-8}$	-	FC
АСР 100 IPWR, КНР	100 / 310	15.0 / 283-323	4.0 / 290°C	-	$10^{-7}$	$10^{-8}$	0,3 g	FC
SMART IPWR, Корея	100 / 330	15,0 / 296-323	5,0 / -	0,34	$2 \times 10^{-7}$	-	0,18 g	FC
CAP 150 IPWR, КНР	150 / 450	15.5 / 290-310	-	-	$3.5 \times 10^{-8}$	$10^{-9}$	0,3 g	FC
SMR-160 PWR, США	160 / 525	15.5 / 196-316	2.26 / перегрев 77°C	-	-	-	-	NC
mPower IPWR, США	195 / 575	14.8 / 291-319	-	-	$10^{-8}$	-	-	FC
CAP 200 PWR, КНР	200 / 660	15,5 / 289-313	6,02 / -	-	$10^{-6}$	$10^{-7}$	-	FC
SMR IPWR, США	225 / 800	15,5 / 294-324	-	-	$5 \times 10^{-8}$	-	-	FC
DMS BWR, Япония	300 / 840	7.17 / 186-287	-	-	$5 \times 10^{-8}$	-	0,45 g	NC

# Параметры проектов АСММ зарубежного дизайна

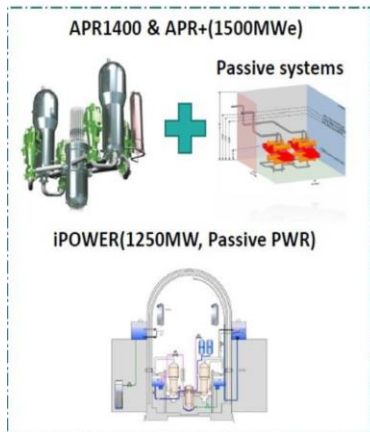
АС ММ	Цена \$/КВт / с/КВтч	Срок строит. (мес.)	Срок службы (лет)	Топл. цикл (мес.)	СБ	Автономн. при ЗПА (час)	Особенности
CAREM IPWR, Аргентина	-	36	60	14	2 канала пассив.	36	-
Nu Scale IPWR, США	3600-10000 / -	36	60	24	2 канала пассив.	>72 при SBO - ∞	РУ и ЗО в воде ниже уровня земли
ACPR50S PWR, КНР	7900 / 19	36	40	30	2 канала пассив	>168	-
ACP 100 IPWR, КНР	5000*	36	60	24	2 канала пассив	от 72 до 336	РУ под землей
SMART IPWR, Корея	10000** / 4,5	36	60	36	4 канала пассив	>72 при SBO – 20 суток	Электричество и вода для города 10 <sup>5</sup> человек
CAP 150 IPWR, КНР	-	36	80	36	4 канала пассив	> 168	РУ под землей
SMR-160 PWR, США	-		80	24	2 канала пассив.	В ЗО воды на > 60сут	-
mPower IPWR, США	-	35	60	24	2 канала пассив	Зона 7-14 суток > 72 ЗО	БВ под землей автономность 30 суток
CAP 200 PWR, КНР	-	36	60	24	пассив	от 168 до 336	Конт. под землей
SMR IPWR, США	-	18-24	60	24	3 канала пассив	>168	100% байпас турбины
DMS BWR, Япония	≈ как ABWR	24	60	24	3 актив. + 1 пассив.	>168	-

# Основные тенденции развития АСММ в России и за рубежом. Параметры конкурентоспособности

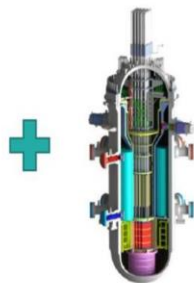
1. Безопасность – существенное повышение
  - Снижение CDF до  $10^{-7}$  и LRF до  $10^{-9}$
  - Автономность (включая БВ) при ЗПА неделя и до бесконечности
  - **Кардинальное упрощение СБ**
2. Понижение параметров первого и второго контура – рост надежности, упрощение
3. Подземное расположение – защита от падения самолета, подпитка водой СБ
4. Применение естественной циркуляции для теплосъема в активной зоне
5. Продолжительность топливного цикла 24-36 месяцев
6. Срок строительства 24-**36** месяцев
7. **Кардинальное повышение эффективности оборудования турбинного острова**
8. Границы планирования АМ в пределах площадки
9. Требования к АСММ определяются потребителем, т.е. от системы выдачи мощности, тепловой энергии и т.д.
10. Использование цифровых двойников при проектировании и оптимизации АСММ
11. Аддитивные технологии, ИНС, предиктивная аналитика, двигатели Стирлинга

# Направления оптимизации АСММ в Ю.Корее

## APR1400 & Large Advanced Reactors



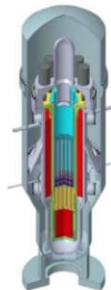
## SMART(100MWe)



Integrated Type PWR with multiple application features

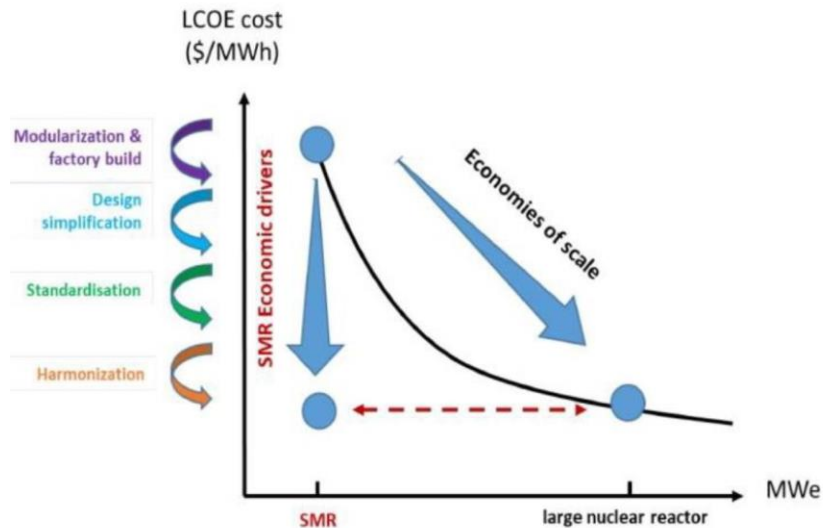
SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)

## i-SMR(170MWe)



Higher Safety  
Better Economics  
More Flexibility

i-SMR(innovative- SMR)



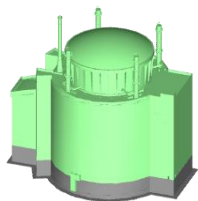
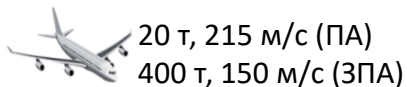
[Ref.: NEA No. 7560, OECD 2021]



# Сопоставление АС: малые только по мощности

Для сравнения строительных объёмов принято равенство функциональности систем основного процесса генерации и СБ, размещённых в представленных зданиях

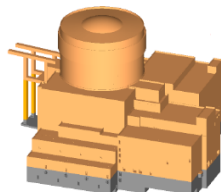
## БН-1200М



440,82 тыс.м<sup>3</sup>

Реакторное отделение, БВ, БПУ, обстройка

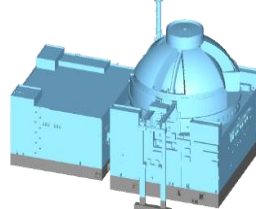
## ЛАЭС-2



440,80 тыс.м<sup>3</sup>

Здания реактора, паровой камеры, безопасности, управления и вспомогательный корпус

## КурАЭС-2



536,00 тыс. м<sup>3</sup>

Здание реактора, вспомогательное реакторное здание, РПУ

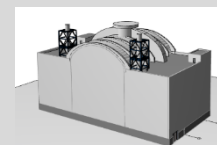
## МБИР



498,2 тыс. м<sup>3</sup>

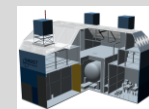
Здание реактора, вспомогательное здание

## РИТМ-200Н ШЕЛЬФ-М



104 тыс. м<sup>3</sup>

Здание реактора, инженерные корпуса



ок 18 тыс. м<sup>3</sup>

В соответствии с обязательным требованием НП-064-17 при расчете зданий и сооружений атомных станций на воздействие от падения самолета необходимо принимать динамическую нагрузку, соответствующую самолету массой не менее 5 т.



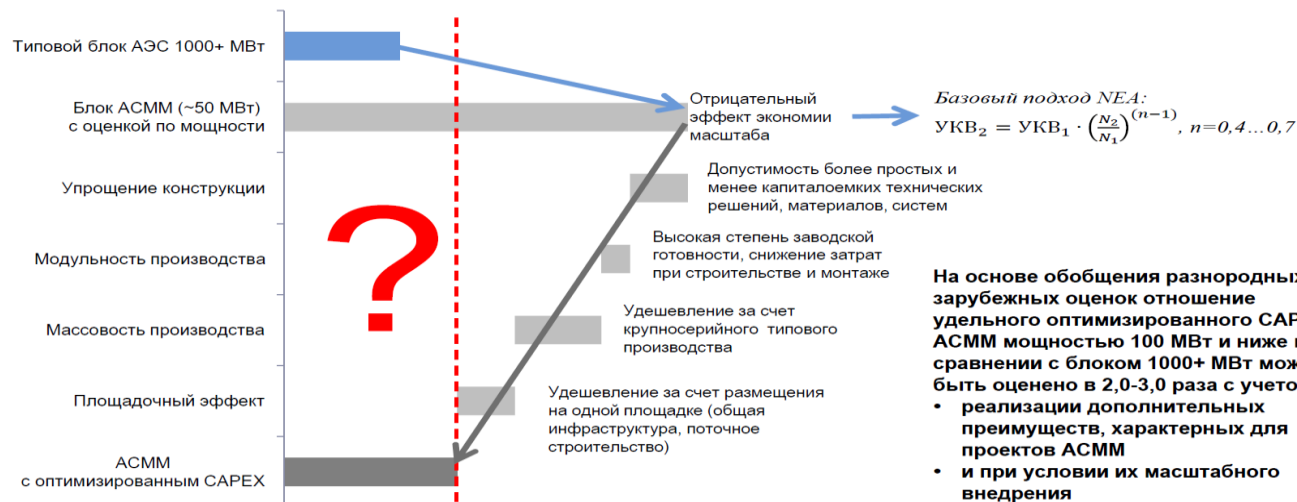
# Заключение (из Отчета рабочей группы по АСММ, декабрь, 2020)



- Для дальнейшей разработки и фактической реализации в качестве автономного энергетического источника в диапазоне мощностей до 1 до 3 МВт электрических предлагаются концепции транспортабельных (транспортируемых) энергетических источников с ядерными реактором и системой преобразования на базе традиционных ТГУ (водоохлаждаемые РУ) и на базе ГТД (высокотемпературные реакторы). Необходимо в рамках ЕОТП проработать данные концепции, провести ТЭИ и обосновать выбор единой концепции для дальнейшей проработки.
- Выполненный анализ зарубежной литературы и результаты расчетных исследований, проведенных во ВНИИАЭС позволяют сформулировать следующие требования к АСММ мощностью 4-12 МВт и более:
- теплоноситель ЖМТ или ЖСР. Позволяет отводить остаточные тепловыделения к стенке корпуса без кипения и далее к окружающему воздуху и отказаться от каналов безопасности;
- рабочее тело – диоксид углерода сверхкритических параметров, работающий по циклу Брайтона. Позволяет в разы сократить весогабаритные характеристики и упростить систему управления машзалом;
- вместо аварийных дизель-генераторов использовать генераторы с двигателем Стирлинга;
- вместо аварийных аккумуляторных батарей использовать ТЭГи;
- отечественная система управления с привлечением нейронных сетей и элементов предиктивной аналитики, позволяющая надежно эксплуатировать энергоблок с прогнозированием остаточного ресурса до ремонта.
- Начиная со стадии разработки концепции ЯЭУ и для проведения более полных ТЭИ необходимо применение технологии цифрового двойника, которая позволяет снизить сроки разработки проекта АСММ, обеспечить значительное снижение весогабаритных характеристик путём оптимизации технических решений, снизить сроки производства и себестоимость модулей АСММ.



## Факторы снижения стоимости АСММ



- Конкуренентоспособный блок АСММ - массовый промышленный, платформенный продукт с высокой степенью модульности, адаптируемый под конкретный заказ
  - Если серийность крупных блоков АЭС сопоставима с серийностью ракет-носителей (единицы в год)
    - То серийность блоков АСММ может быть сопоставима с серийностью авиалайнеров (десятки в год)

# Повышение надежности и естественной безопасности при снижении параметров АСММ. Упрощение ТС. Снижение LCOE

## Зависимость КТП от давления

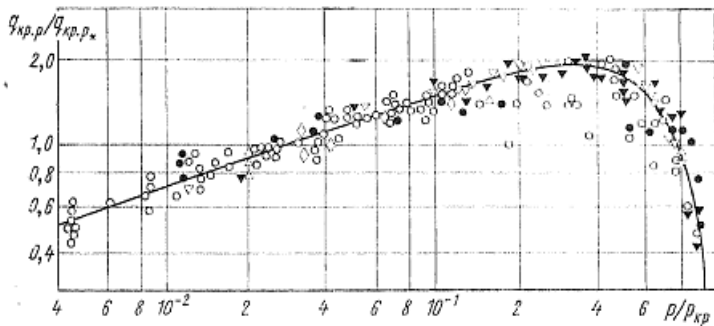
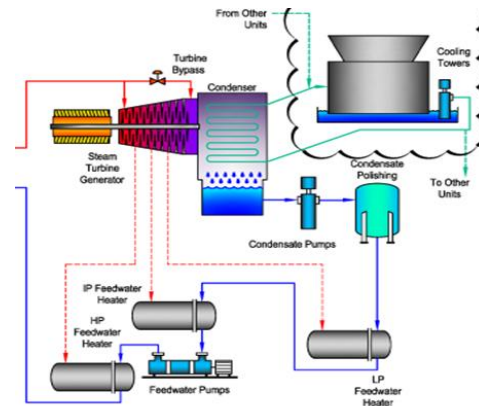


Рис. 12.16. Зависимость первой критической плотности теплового потока от давления [5]:

○ — вода; ● — этиловый спирт; △ — бензол; ◦ — гептан; ▽ — метиловый спирт; ▾ — пропиловый спирт.

## Инверсия влажности при дросселировании пара

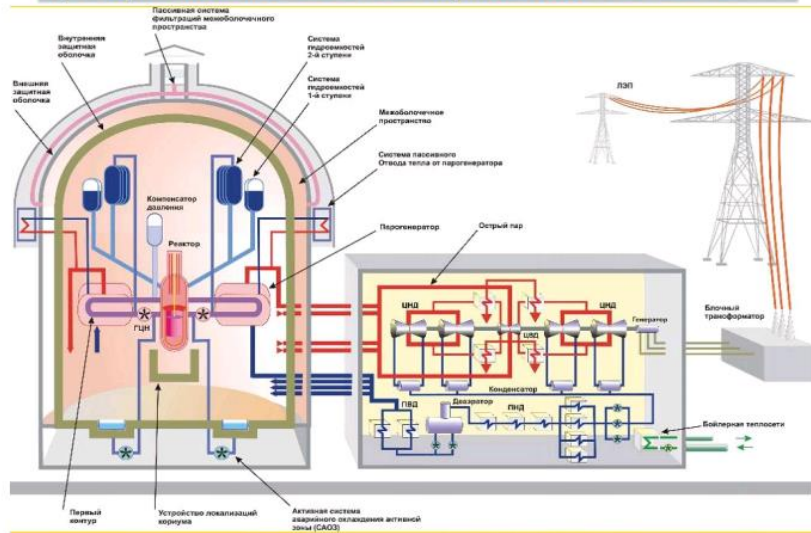
Турбина	Давление пара, МПа		Энтальпия пара, кДж/кг		Теплота парообразования для давления перед турбиной, кДж/кг	Рост влажности пара при дросселировании Δω, %
	в парогенераторе	перед турбиной	в парогенераторе	перед турбиной		
K-70-29	3,2	2,9	2801,8	2801,8	1802,3	0
K-220-44	4,6	4,3	2795,2	2797,2	1681,7	+0,119
K-1000-60/1500	6,26	5,88	2778,8	2783,3	1569,4	+0,285



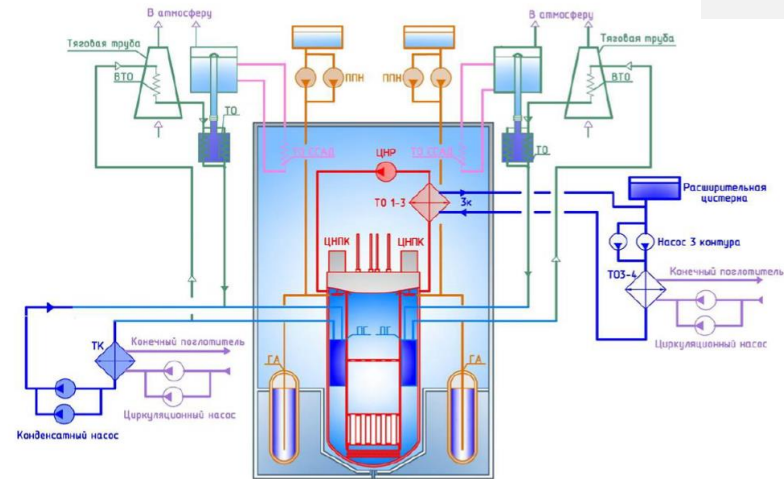
# ВВЭР-1200 и РИТМ-200Н. Найди 10 отличий. Конфигурации СБ похожи

Краткая характеристика энергоблока

## Принципиальная схема энергоблока НВАЭС-2



## Комплекс систем безопасности



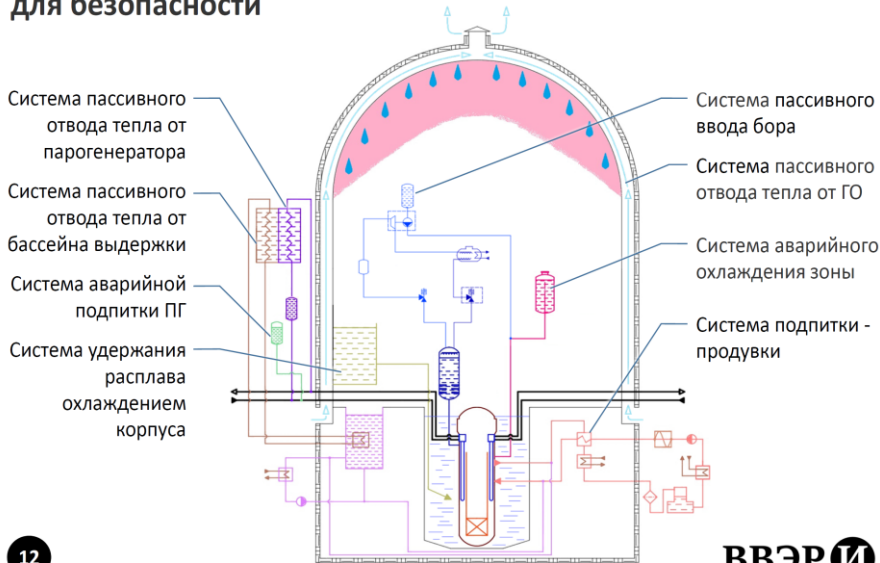
# АСММ на базе РУ ШЕЛЬФ-М. Обликовые решения (из презентации Куликова Д.Г. на Дне безопасности, октябрь 2022)



Площадь земельного участка в ограждении, м <sup>2</sup>	Площадь застройки, м <sup>2</sup>	Длина охраняемого периметра, м	Протяженность дорог, м	Площадь автодорожного покрытия, м <sup>2</sup>	Плотность застройки, %	Удельная площадь промплощадки, Га/МВт
16 823	3852	588	690	1808	23	0,21

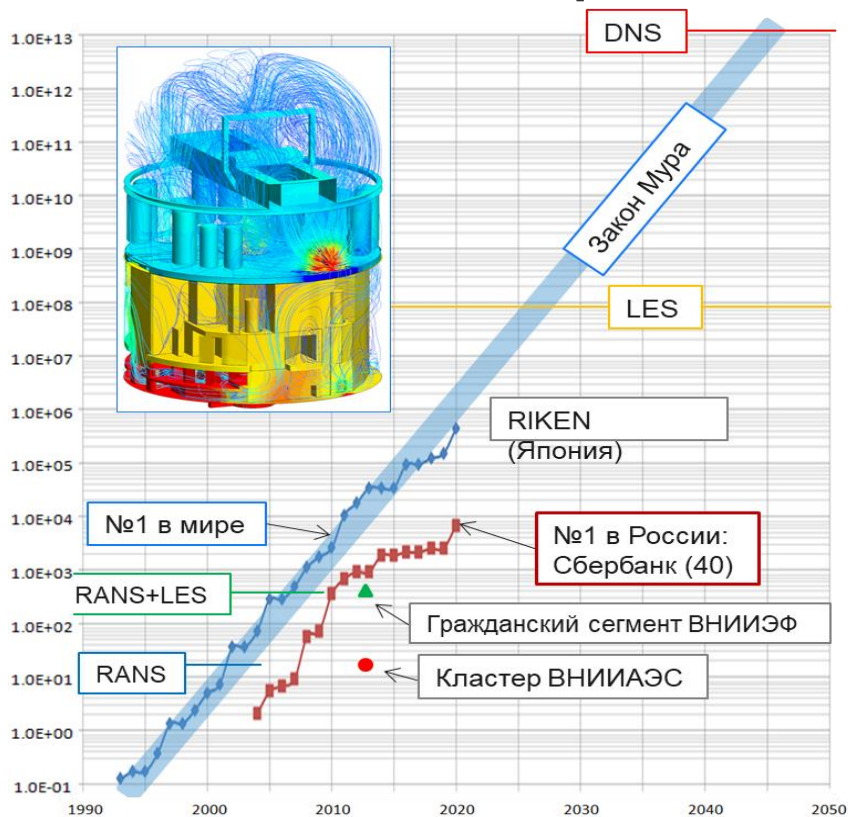
# ВВЭР-И: одна РУ в ЗО; Билибинская АЭС: 4 РУ в одном здании

## Структура систем важных для безопасности

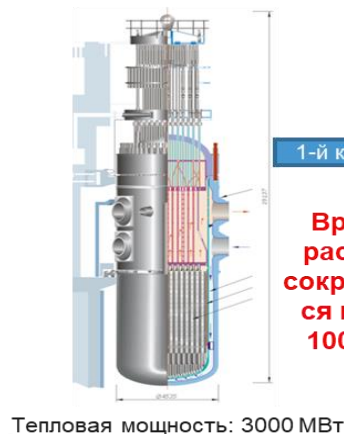
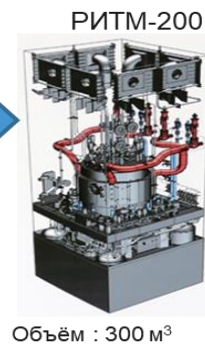




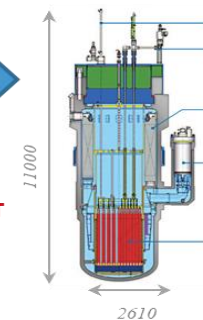
# АСММ: сокращение затрат на расчетное обоснование. Рост производительности СуперЭВМ позволяет выполнить «точные» расчеты



Время  
расчета  
сокращает  
ся в 20 -  
1000 раз



Время  
расчета  
сокращает  
ся в 10 -  
100 раз



# АСММ: снижение затрат на экспериментальные программы. Переход от «одномерных» стендов к «трехмерным»

ПСБ NuScale 1:3 линейный масштаб  
(1:27 - объем/мощность)



ПСБ РБМК 1:48 (мощность) и ПСБ ВВЭР 1:300  
(мощность, 1:17.3 - диаметр).  
По высоте 1:1

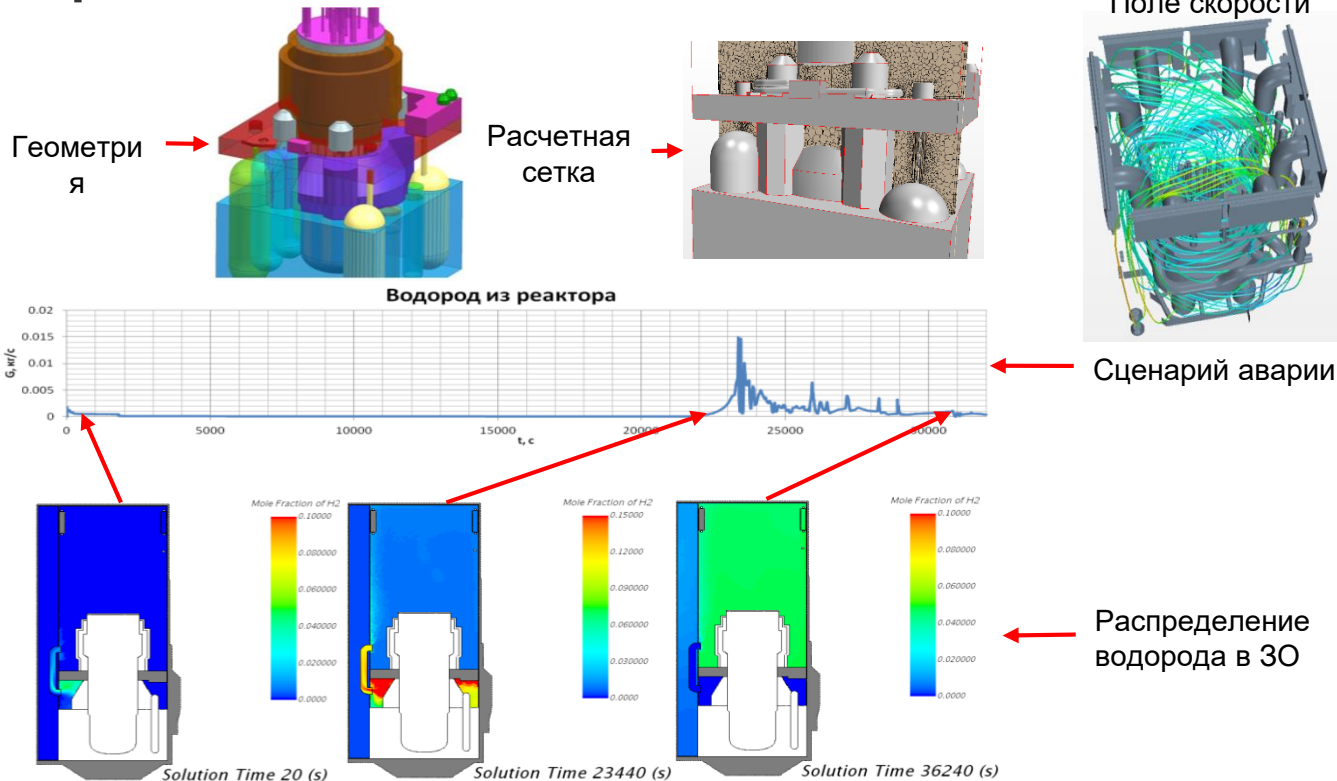




# ЦД -Комплексный подход к разработке проекта



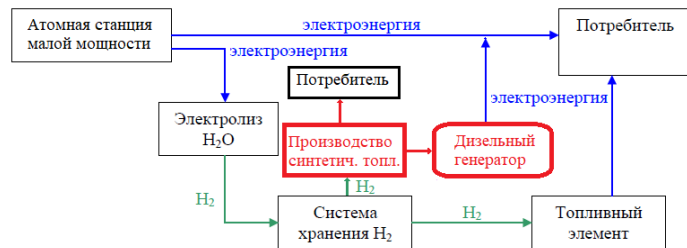
# Водородная взрывобезопасность АСММ на примере РИТМ-200. Релокация ПКРВ на основе CFD-моделирования



# АСММ: проблемные вопросы

- АСММ обладает всеми составляющими ядерной и радиационной опасности
- Разработка основанных на принципах внутренней самозащищенности и пассивных систем защиты АСММ с повышенными стандартами безопасности. Минимизация обслуживающего персонала.
- Подготовка научно-производственной базы для проведения стендовых испытаний и создания головных образцов энергоустановок.
- Разработка оборудования устойчивого к изменению частоты сети.
- Разумное повышение автономности АСММ при аварийных процессах.
- Устойчивость работы АСММ (длительная работа турбины на собственные нужды, 100% байпас турбины и т.д.). Упрощение системы управления.
- Освоение технологий и мобилизация промышленных мощностей для серийного производства АСММ.
- **Цифровые двойники, нормативная база «заточена» на подходы прошлого тысячеления.**
- Обеспечение физической защиты АСММ.

# АСММ с химическим (водород) накопителем: увеличение степени автономности и повышение экологичности удалённых объектов



Для целей хранения энергии водород получают преимущественно методом электролиза.

**КПД:** 50-70%

**Срок службы:** не применимо

**Мощность:** от 80 кВт

**Снижение ёмкости:** отсутствует

**Экологичность:** экологически безопасно

**Применение водородных накопителей энергии увеличивает экономическую эффективность АСММ.**

Накопленный водород можно дополнительно использовать:

- Как экологически чистое топливо для транспорта на ВТЭ (при сгорании образуется вода);
- Для добавления в дизтопливо (улучшение свойств);
- Для получения (из водорода и азота воздуха) синтетического экологического топлива **аммиака** для прямой заправки транспорта с ДВС (при сгорании образуется вода и азот).
- Как резервного топлива для снабжения АСММ и Потребителя при плановом или аварийном останове
- Обеспечение топливом близлежащих объектов (**Исключение Северного завоза топлива**).



# Основные требования к АСММ

- Возможность серийного производства реакторных установок.
- Модульный принцип компоновки при формировании необходимой мощности и возможность ее изменения в зависимости от потребностей целевой площадки.
- Полная или высокая степень заводской готовности к эксплуатации.
- Транспортабельность отдельных модулей или блоков.
- Минимизация объемов и стоимости строительно-монтажных работ.
- Автономность, надежность и устойчивость эксплуатации.
- Упрощение процедур снятия с эксплуатации, вывоз ОЯТ и РАО вместе с энергоустановкой.
- Существенное снижение экологических последствий для окружающей среды.
- Возможность работы в режиме когенерации, опреснения воды, выработки водорода.
- Прорыв в турбомашиностроении и в теплообменном оборудовании.

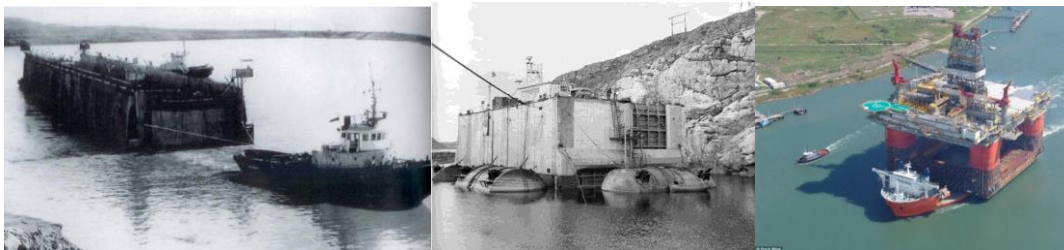
# Пути Решения:

## Минимальная зависимость от местных условий на этапе строительства

Достигается повышением предварительной готовности монтируемых конструкций и оборудования за счет переноса большей части сложных работ в стационарные заводские условия при выполнении этих работ квалифицированным персоналом.

Монтаж укрупненными модулями заводской готовности:

*а) Высший уровень готовности -использование наплавного метода строительства*



История метода:

- С 1970 г ведется строительство буровых и нефтедобывающих платформ
- Строительство целлюлозного завода японской фирмой «1Н1» в Бразилии на р. Амазонка 1976 г за 36 месяцев
- Установка блока главного здания приливной ГЭС в Кислой губе, 1960 г
- Строительство дамбы для защиты Ленинграда от наводнений 1984 г

*б) Монтаж крупноразмерными модулями*

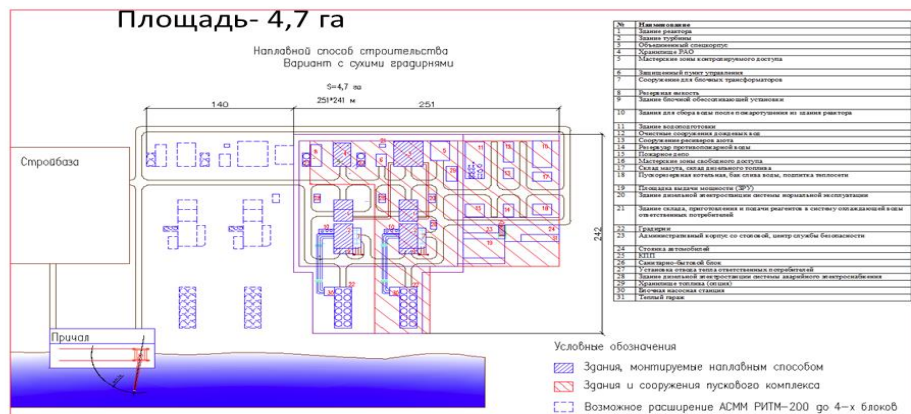


История метода:

- Строительство Запорожской и Балаковской АЭС , 1981-86 г.
- Строительство АЭС Shimane-3, Япония, 2010 г.
- Строительство АЭС AP1000 в Sanmen Китай, 2011



# Предложения ВНИИАЭС. Отчет 2018 года «Технико-экономические исследования по обоснованию конкурентоспособности АСММ с РУ Ритм-200 на российском и зарубежных рынках»



Доставка Северным морским путем



- Транспортировка модулей полупогружным судном типа «Blue Marlin»
- Доставка к берегу с помощью приставных понтонов

- Доставляемые здания-модули: реакторные (2), турбинные (2), объединенный спецкорпус, хранилище РАО, блоки вентиляторных градирен (2). Отмечены на генплане синей штриховкой



---

---

ТОЧКА ЗРЕНИЯ

---

---

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В РОССИИ

© 2023 г. С. Л. Соловьев<sup>а,\*</sup>, Д. Г. Зарюгин<sup>б,\*\*</sup>, С.Г. Калякин<sup>а,\*\*\*</sup>

<sup>а</sup>АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций»,  
Москва, Россия

<sup>б</sup>Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва, Россия

\*E-mail: [SLSoloviev@vniiaes.ru](mailto:SLSoloviev@vniiaes.ru)

\*\*E-mail: [DGZaryugin@rosatom.ru](mailto:DGZaryugin@rosatom.ru)

\*\*\*E-mail: [SGKalyakin@vniiaes.ru](mailto:SGKalyakin@vniiaes.ru)

Поступила в редакцию 09.11.2022 г.

После доработки 14.12.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

# Основные выводы

1. Востребованность АСММ и их конкурентоспособность во многих конкретных условиях их перспективного использования очевидны, о чем свидетельствует прогрессивно возрастающий интерес в мире к их разработке и применению. Необходима тесная работа с надзорным органом по опережающему обоснованию новых норм и правил открывающих путь масштабному наращиванию строительства АСММ с опорой на достигнутую референтность технологий АСММ в России.
2. Развитие АСММ не означает лишь очередное наращивание доли ядерных энергоисточников в топливно-энергетическом балансе. Создание АСММ связано с качественно новой философией применения атомной энергии и, прежде всего, с готовностью успешно интегрироваться в углеродно-нейтральную энергетику будущего, а также с разработкой технологии централизованного обращения с ОЯТ и РАО. АСММ – как надежный источник энергоснабжения критически важной инфраструктуры.
3. Повышение конкурентоспособности АСММ возможно через внедрение технологий XXI века (аддитивные, цифровые, ИНС, и др). **Оценка «предельных» ТЭХ для различных реакторных технологий. Экспертиза ЦД (полная).** Успешное развитие и внедрение перспективных технологий требует тесной научной кооперации.

**Спасибо  
за внимание**

[www.rosatom.ru](http://www.rosatom.ru)

**25.10.2023**

