

Какие АСММ нам нужны?

С.Л. СОЛОВЬЕВ

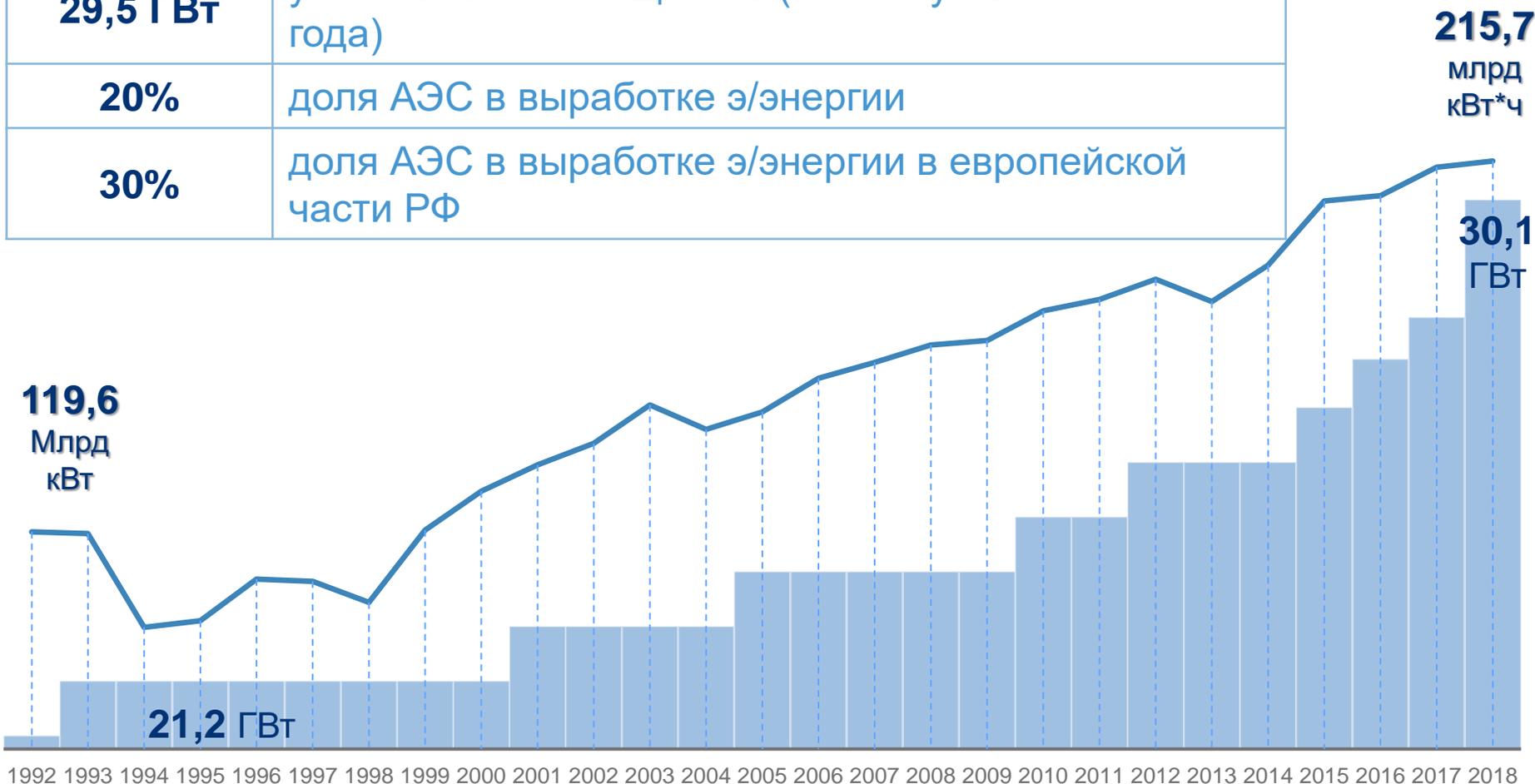
Обнинск

13 октября 2022 г.

Динамика выработки электроэнергии. Итоги 2021 года – 222.436 млрд кВтч

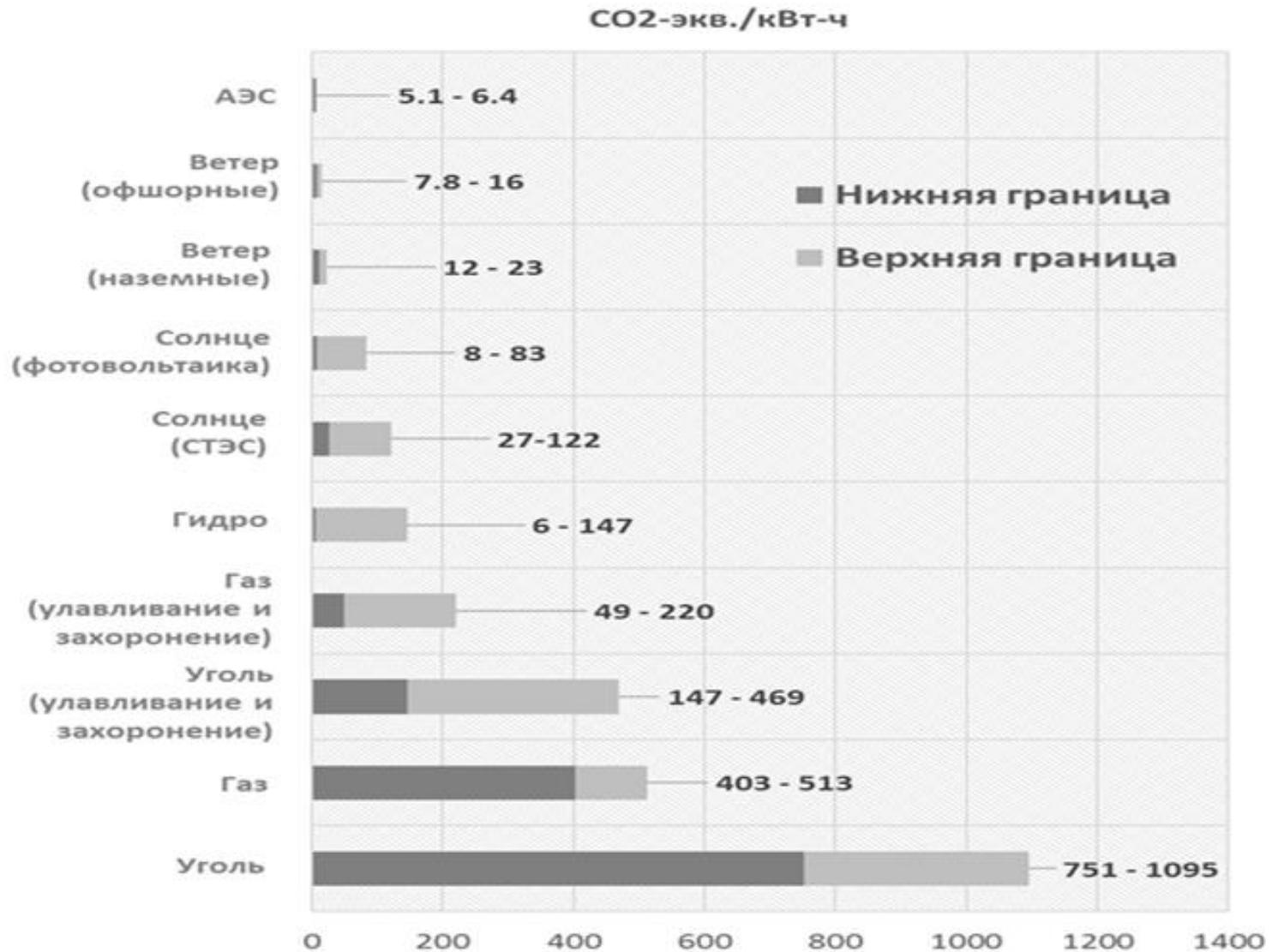


37 э/блоков	на 11 АЭС в течение года
29,5 ГВт	установленная мощность (максимум в течение года)
20%	доля АЭС в выработке э/энергии
30%	доля АЭС в выработке э/энергии в европейской части РФ



1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018

Углеродный след



Применение водородных технологий для увеличения экономической эффективности АСММ для энергоснабжения удалённых территорий



Рассматриваются АСММ сверхмалой мощности линейки единичных энерго мощностей от 10 МВт (эл.) до 250 кВт (эл.) для энергоснабжения объектов:

- Добывающие, перерабатывающие и производственные энергоемкие объекты;
- Центры и объекты контроля и управления, ГО и ЧС, ситуационные центры;
- Поселки, города (до 50 тыс. жителей), базы, инфраструктурные объекты по СМП.
- Линейные и узловые подстанции электроснабжения железнодорожного сообщения вне зоны сетевой генерации;



Основной режим работы АСММ – **суточное и сезонное маневрирование мощностью.**

Недостатки:

- необходимость иметь значительный запас мощности;
- неэффективное топливоиспользование;
- Снижение ресурса основного оборудования;



Часть не востребованной электроэнергии **преобразовывается в водород**, который затем используется для выработки дополнительной энергии для покрытия пиков потребления

Накопитель энергии представляет собой дополнительные резервные мощности на случай аварийной ситуации, или остановки АСММ на ремонт и перегрузку

Перспективные области применения АСММ

- Региональные распределенные энергетические системы.
- Объекты локальной энергетики.
- Энергоснабжение единичных потребителей (объекты нефтегазового промысла, горно-обогатительные комплексы, металлургические предприятия).
- Гражданские аэропорты, объекты портовой инфраструктуры.
- Метеорологические и гидрологические станции.
- Обеспечение радиосвязи, радиолокационной и навигационной поддержки для транспортной инфраструктуры в Арктике.
- Энергообеспечение объектов МО.
- Производство АСММ с целью их экспорта в страны Юго-Восточной Азии, Африки.
- Когенерация, обессоливание воды, производство водорода для обеспечения маневрирования.

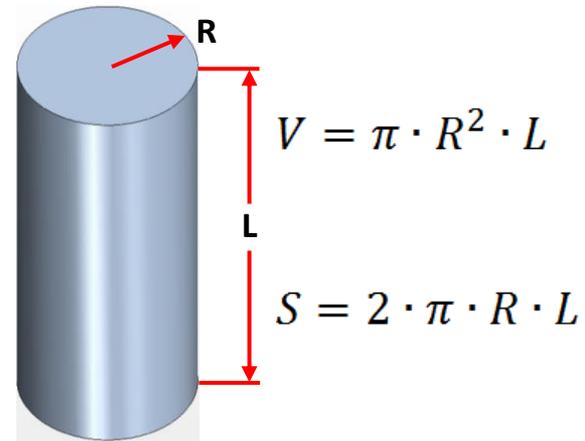
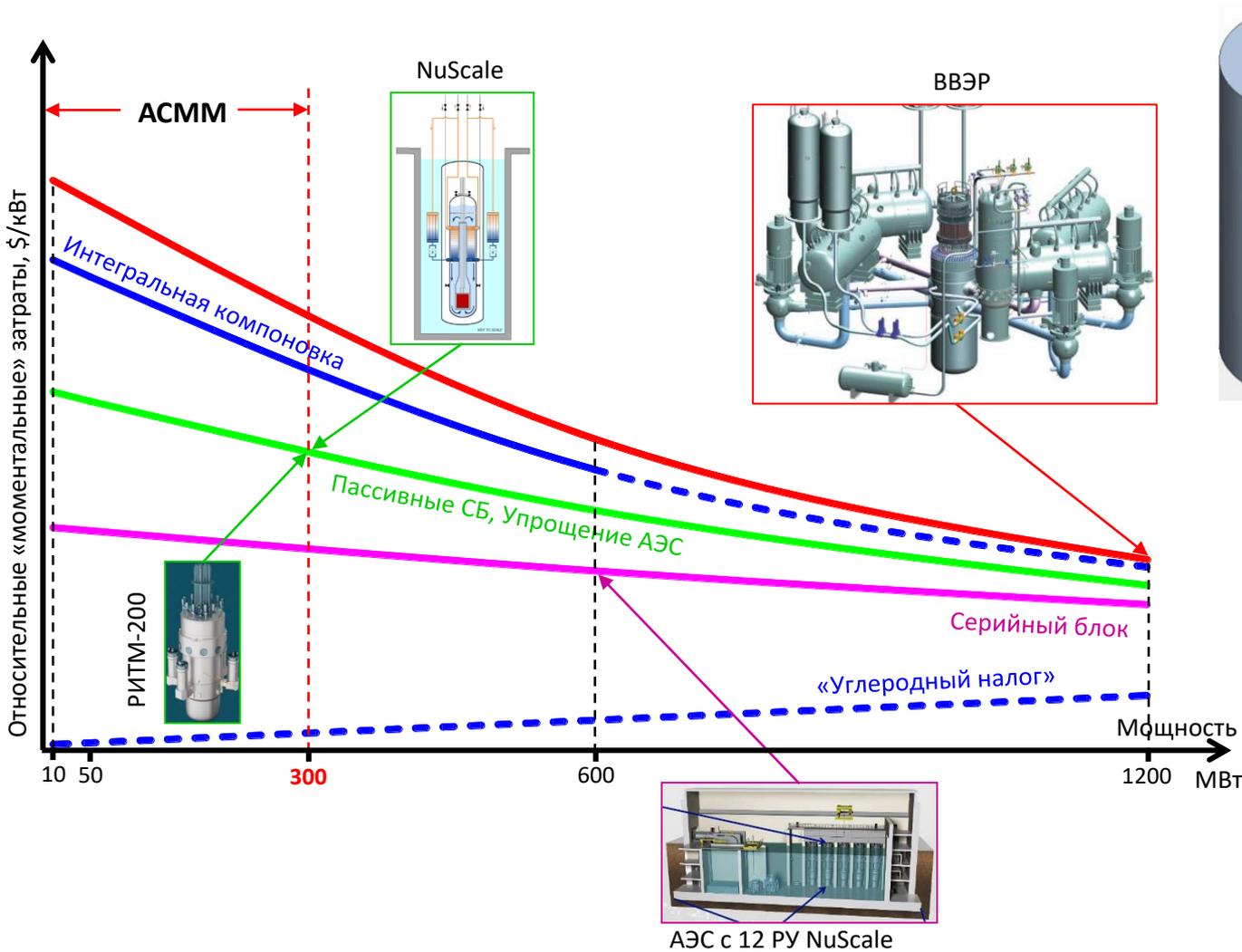
Перспективные проекты АСММ (Россия). Есть отличия по параметрам. Требуется дополнительный анализ.



Параметры проектов АСММ зарубежного дизайна

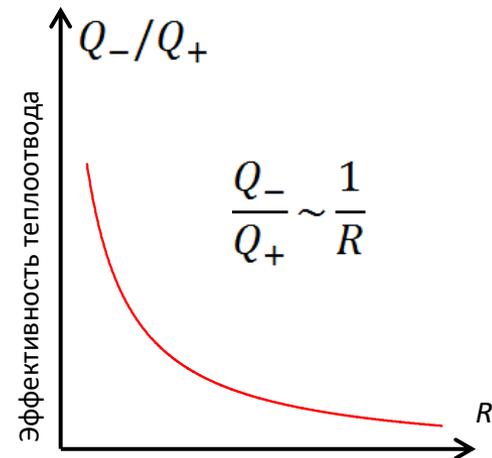
АС ММ	Цена \$/КВт / с/КВтч	Срок строит. (мес.)	Срок службы (лет)	Топл. цикл (мес.)	СБ	Автономн. при ЗПА (час)	Особенности
CAREM IPWR, Аргентина	-	36	60	14	2 канала пассив.	36	-
Nu Scale IPWR, США	3600-10000 / -	36	60	24	2 канала пассив.	>72 при SBO - ∞	РУ и ЗО в воде ниже уровня земли
ACPR50S PWR, КНР	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 ⁵ 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	-

МЕТОДЫ ИХ СНИЖЕНИЯ



$$Q_+ = q_l \cdot V$$

$$Q_- = k \cdot S$$



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

Инверсия влажности при дросселировании пара

Зависимость КТП от давления

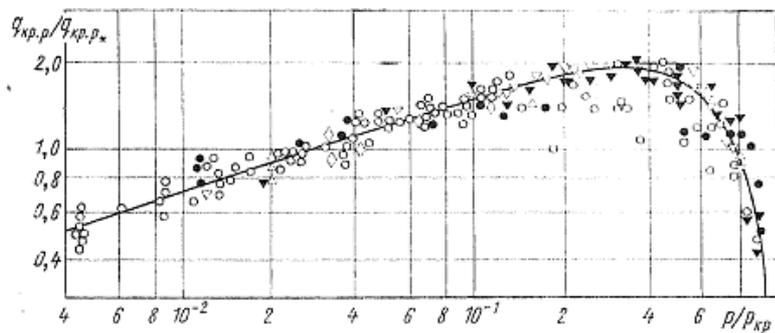
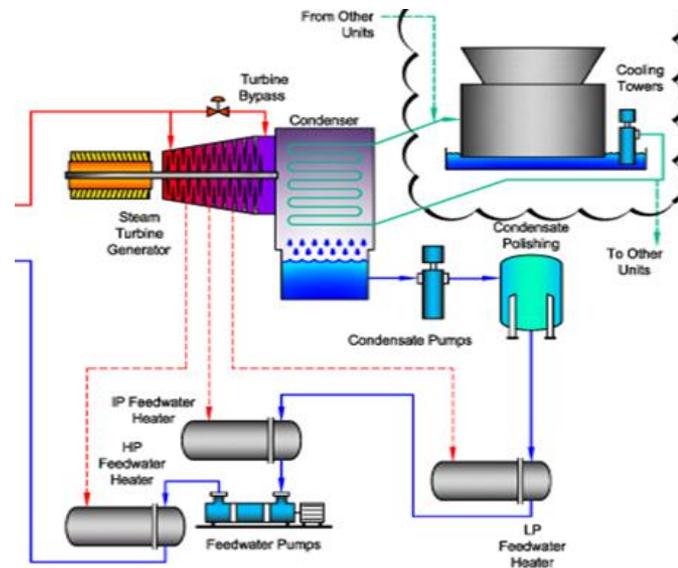
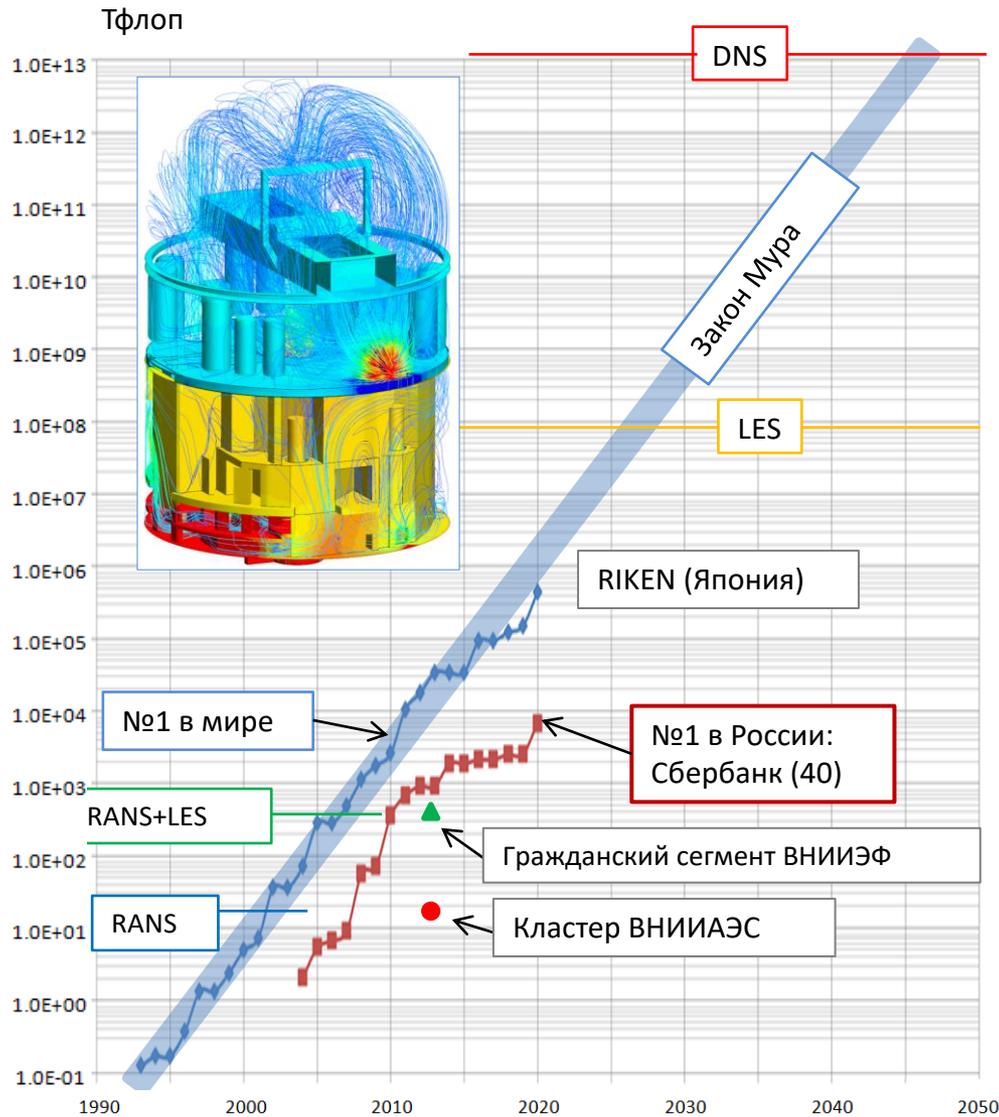


Рис. 12.16. Зависимость первой критической плотности теплового потока от давления [5]:
 ○ — вода; ● — этиловый спирт; △ — бензол; ◊ — гептан; ▽ — метиловый спирт; ▾ — пропиловый спирт.

Турбина	Давление пара, МПа		Энтальпия пара, кДж/кг		Теплота парообразования для давления перед турбиной, кДж/кг	Рост влажности пара при дросселировании $\Delta\omega$, %
	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



АСММ: сокращение затрат на расчетное обоснование проекта. Рост производительности СуперЭВМ



ВВЭР-1000



Объем : 60'000 м³

РИТМ-200

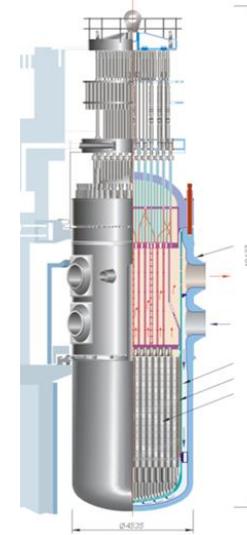


Объем : 300 м³



30

Время
расчета
сокращается
в 20 - 1000
раз

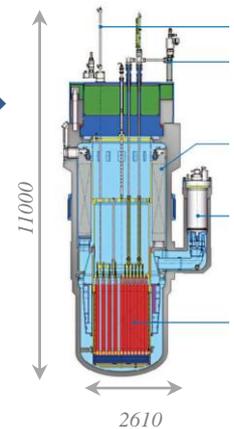


Тепловая мощность: 3000 МВт



1-й контур

Время
расчета
сокращается
в 10 - 100 раз



Тепловая мощность: 175 МВт

Цифровые двойники АСММ с РУ РИТМ-200 и с РУ ШЕЛЬФ

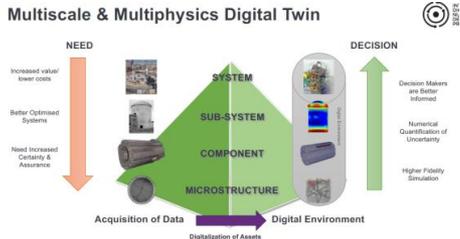
Цифровой двойник – БД + модели + инструменты визуализации в 3D + программные продукты + получаемые в он-лайн режиме эксплуатационные данные. **Цифровой двойник** позволяет моделировать работу объекта в НУЭ, при НУЭ и при авариях. **Цифровой двойник** служит для оптимизации проектных, конструкторских, технологических решений, создания тренажёров, сопровождения эксплуатации и вывода из эксплуатации.

Цифровые двойники АЭС в мире:

- Франция (EDF) разработка виртуального реактора в рамках проекта «АЭС будущего» + независимое подразделение в EDF для верификации проектов

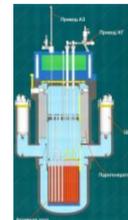


- проект «Интегрированная ядерная цифровая среда» INDE (Integrated Nuclear Digital Environment), Великобритания.



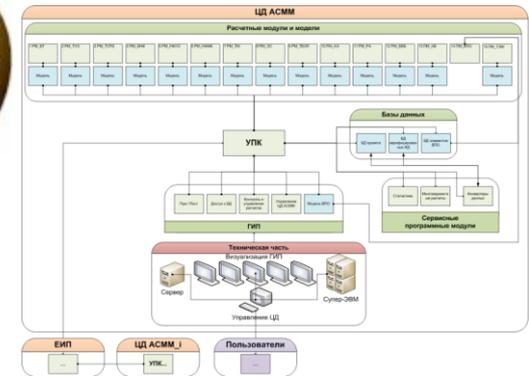
- В 2020 году начата работа по разработке цифровых двойников АСММ с РУ РИТМ-200 и с РУ ШЕЛЬФ.
- Сохраняется референтность решений принятых в проекте ПТК ВЦАЭС, расширяются возможности исследовательской версии.

АСММ с РУ «Шельф»



АСММ с РУ РИТМ-200

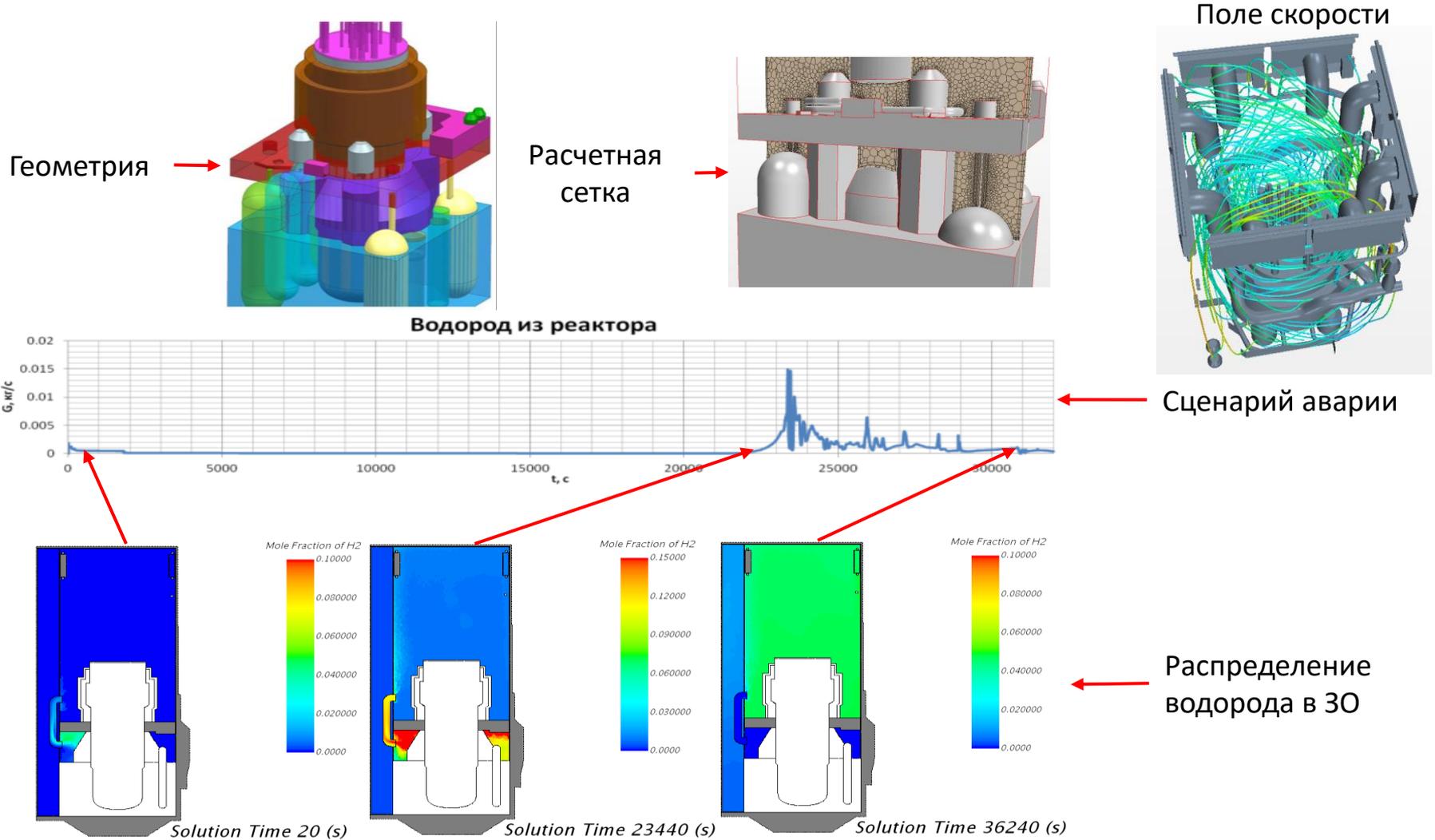
Структура ЦД АСММ



- Участники проекта: АО «ВНИИАЭС», АО «ОКБМ Африкантов», АО «НИКИЭТ», АО «Гринатом», ВШЭ, МИФИ, МЭИ. МГТУ, ИБРАЭ РАН, ИВТ РАН и др.



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

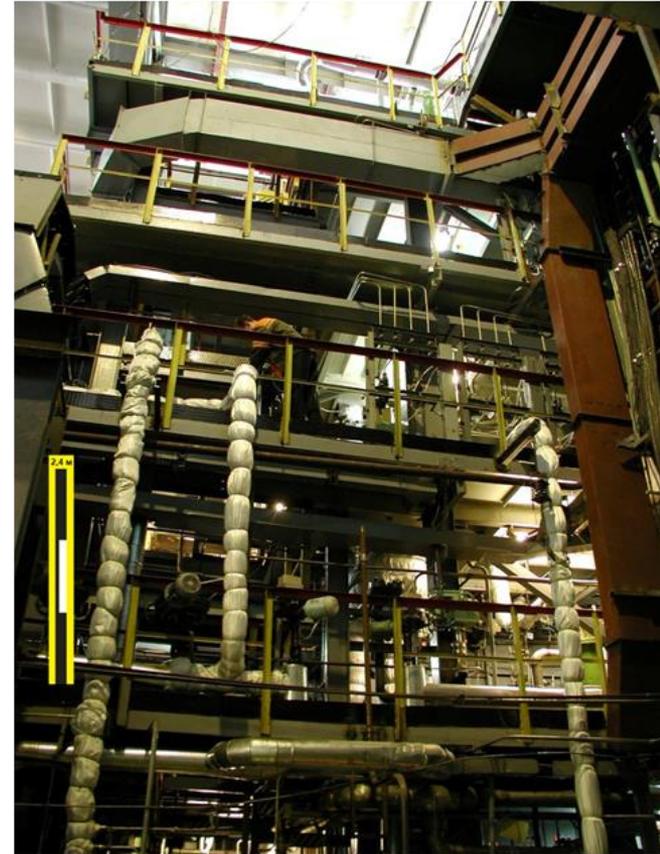


АСММ: снижение затрат на экспериментальные программы. Переход от «одномерных» стенов к «трехмерным»

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



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
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. Пассивные системы безопасности 2-4 канала, новые теплоносители и рабочие тела
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

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 и производства водорода.

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.
3. Повышение конкурентоспособности АСММ возможно через внедрение технологий XXI века (аддитивные, цифровые, ИНС, и др). Успешное развитие и внедрение перспективных технологий требует тесной научной кооперации.

Н.А. Доллежалъ: «Самое главное для ученого – предвидеть развитие науки»



Сергей Николаевич

© Доллежалъ
на память

Доллежалъ

23.12.99