



Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

*Атомные станции малой мощности
на базе судовых технологий.
Особенности АТСТ «Елена-АМ»*

Куштан В.В.

Научно-исторический круглый стол под эгидой отечественного Ядерного общества
«Малая атомная энергетика: вчера, сегодня, завтра (ретроспектива и перспективы)»

г. Обнинск

13 октября 2022



- Medium?

S **SMR** **R**

- Modular !

Начиная с 6-го Диалог-Форума ИНПРО, МАГАТЭ, 2013 года аббревиатура SMR используется для **Small Modular Reactors** для обозначения малой атомной энергетики индустриального серийного производства



Обзор отечественного опыта разработки малых реакторов

Разработки по малым реакторам, начатые в России в середине 1950-х годов, продолжались с различной интенсивностью все последующие десятилетия: от разработок концепций до создания и эксплуатации единичных стендов-прототипов и демонстрационных образцов



АМ-1 Первая АЭС
(1x5 МВт) 1952-2002



ЭГП-6 Билиб. АТЭЦ
(4x12 МВт, до 100 Гкал/ч)
1974-н.в.



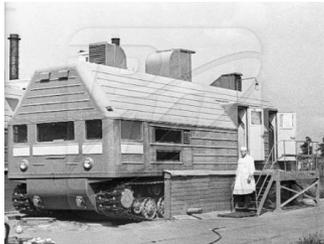
ПАТЭС «Волнолом»
(2x6 МВт, до 2x12 Гкал/ч)
1988-1993 – тех. проект



НС АТЭС «Елена»
(1x68 кВт, до 2.8 Гкал/ч)
1990 – проект станции

Опыт создания атомных источников энергии малой мощности

ТЭС-3 (1x1,1 МВт)
1961-1966



АРБУС (1x0,75 МВт)
1963-1965,
1979-1981



ПАМИР-630Д
(1x630 кВт) 1985-1986



ПЭБ «Академик Ломоносов»
(2x35 МВт, до 25 Гкал/ч)
2019-н.в.



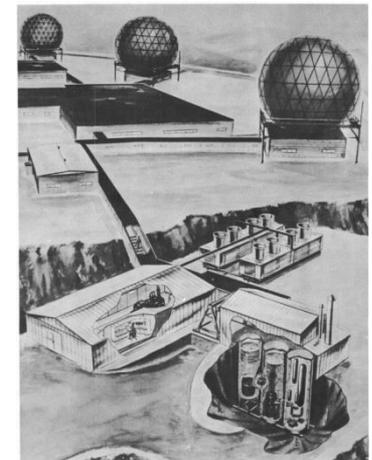


Военная программа армии США по малым реакторам

В армии США «Военная ядерно-энергетическая программа» была направлена на создание малых атомных реакторов для обеспечения электрической и тепловой энергией преимущественно удаленных и практически недоступных объектов.

Программа начата в 1954 году и прекращена в 1977.

	Мощность	Обог.	Площадка	Примечание
			Эксплуатация	
SM-1	2 МВт (эл)	93%	Форт Бельвуар 1957-1973 <i>Использованных зон - 3 Планово выведена из эксплуатации</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Физпуск 8 апреля 1957 г. (на несколько месяцев раньше реактора Шиппингпорт) • Первая в США АЭС, предназначенная для подключения к электросети • Первая АЭС с контейментом • Первое использование нержавеющей стали для оболочек твэлов • За время эксплуатации подготовлено около 800 операторов
SL-1	0,2 МВт (эл) + 0,4 МВт (т)	93%	Национальная лаборатория в Айдахо 1958-1961 Разрушена в результате аварии	<ul style="list-style-type: none"> • Первая авария на АЭС с человеческими жертвами • По результатам аварии в нормативную документацию внесено требование о невозможности достижения реакторами критичности при извлечении 1 группы стержней управления
PM-2A	2 МВт (эл) + тепло	93%	Кэмп Сенчури, Гренландия 1960-1963 <i>Использованных зон - 1 Планово выведена из эксплуатации.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Первая портативная АЭС, собранная из модулей на площадке, а после окончания эксплуатации, демонтированная и перевезенная обратно. • От начала проекта до физпуска прошло 22 месяца (!)
ML-1	Проект – 0,3 МВт Факт. – 0,14 МВт	93%	1961-1965 <i>Стендовый прототип. Фактическая наработка – несколько сотен часов. Планово выведена из эксплуатации.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Первая АЭС, реализовавшая замкнутый газо-турбинный цикл • Первая наземная транспортная АЭС
PM-1	1,25 МВт (эл) + тепло	93%	Авиабазы Сандэнс, США 1962 – 1968 <i>Использованных зон - 2 Планово выведена из эксплуатации</i>	
PM-3A	1,75 МВт (эл) + тепло + опреснительная установка	93%	База ВМС, Антарктида 1962 – 1972 <i>Использованных зон - 5 Планово выведена из эксплуатации</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Первое использование АЭС для опреснения воды
SM-1A	2 МВт (эл) + тепло	93%	Форт Грили, Аляска 1962 – 1972 <i>Использованных зон - 4 Планово выведена из эксплуатации</i>	
MH-1A	10 МВт (эл) + опреснительная установка	4 - 7%	США, Панама 1967 – 1977 <i>Использованных зон - 5 Планово выведена из эксплуатации</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Первая плавучая АЭС (на базе несамоходной баржи), <i>Sturgis</i>



- 6 водо-водяных реактора под давлением
- 1 водо-водяной кипящий реактор
- 1 газовый (первый реактор, реализовавший замкнутый газо-турбинный цикл, отработал всего несколько сотен часов)
- 1 жидкометаллический реактор был спроектирован, построен не был

Расшифровка маркировки:

Первая буква: S – stationary (стационарный), M – mobile (мобильный), P – portable (портативный)

Вторая буква: H - high power (большой мощности), M - medium power (средней мощности), L - low power (малой мощности)

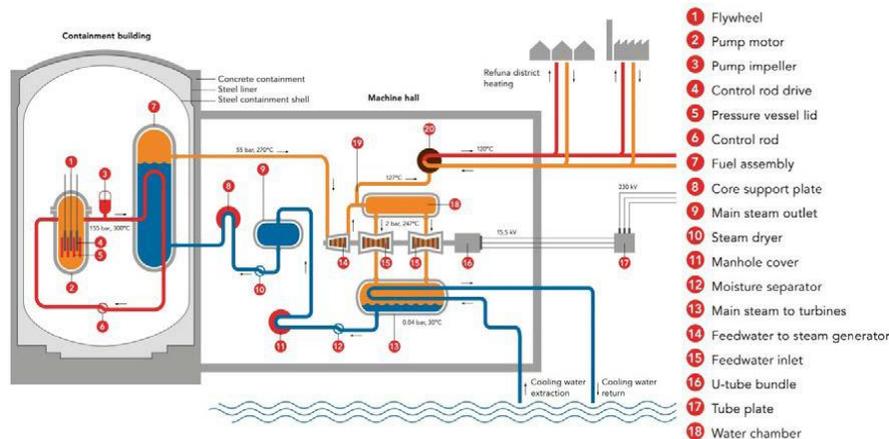
Цифра: порядковый номер

Третья буква: A означает реактор, отработавший в «полевых» условиях



Advances in Small Modular Reactor Technology Developments

A Supplement to:
IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)
2020 Edition



Power Range MW(e)	Reactor Designs
> 301	<ul style="list-style-type: none"> • IMR • AHWR-300 • VBER-300 • GTHTR300 • IRIS
251-300	<ul style="list-style-type: none"> • DMS • GT-MHR • EMF • BREST-OD-300 • SC-HTGR
201-250	<ul style="list-style-type: none"> • Westinghouse SMR • FUJI • MHR-T • ThorCon • LFTR
151-200	<ul style="list-style-type: none"> • mPower • SMR-160 • PBMR-400 • IMSR • Flexblue
101-150	<ul style="list-style-type: none"> • CAP150 • HTR-PM • MSTW • Mk1 PB-FHR • Sm AHTR
51-100	<ul style="list-style-type: none"> • ACP 100 • SMART • MHR-100 • SVBR100 • ACPRS0S
0-50	<ul style="list-style-type: none"> • CAREM25 • NuScale • KLT-40S • HTMR-100 • G4M

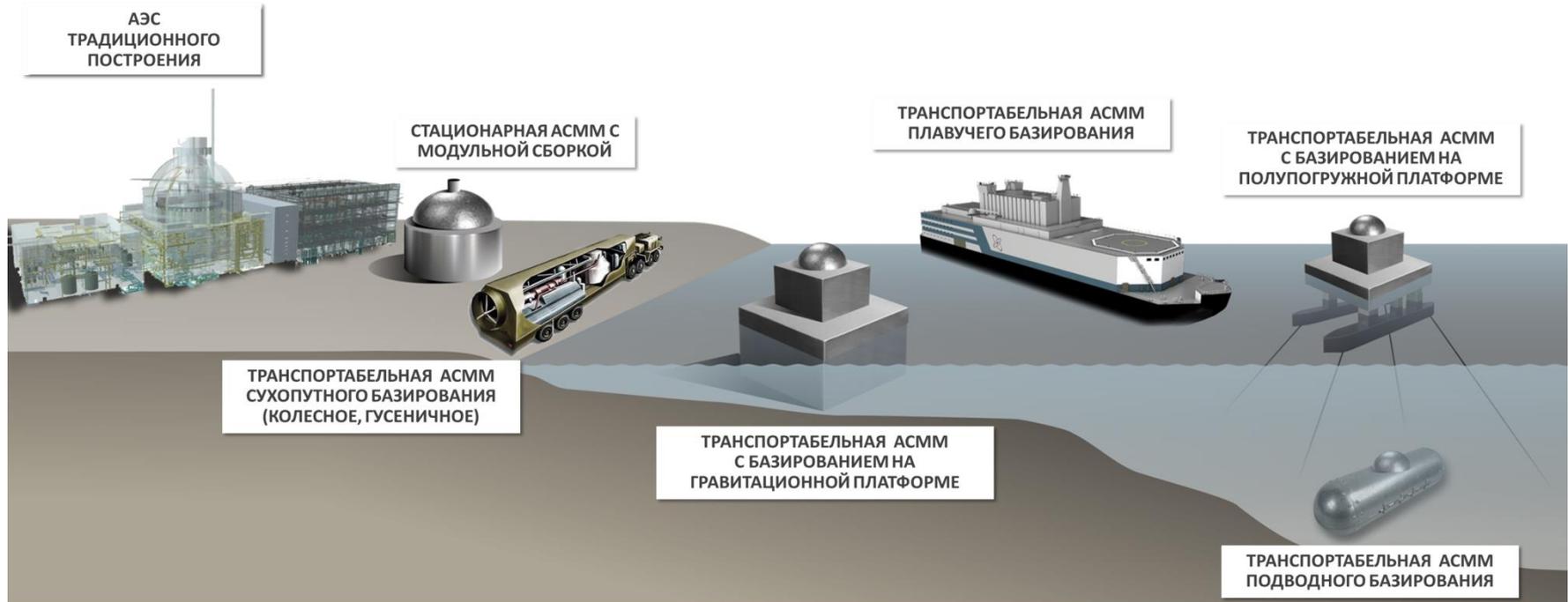
Reactor Designs



Варианты применения АСММ

Основные объекты энергопотребления труднодоступных территорий:

- предприятия морского базирования
- предприятия наземного базирования, инфраструктура рабочих поселков
- инфраструктура поселков малочисленных народов
- морские (речные) портовые терминалы



Мощность, МВт (эл.)

0,1 ... 5

5 ... 20

> 20

Выбранные к реализации проекты АСММ

Наибольшая степень готовности к реализации – проекты на основе ядерных судовых технологий, имеющие высокую референтность, обеспечение всех этапов жизненного цикла и освоенную в производстве элементную базу





АСММ не являются простым масштабированием больших АЭС

- **Простота конструкции. Повышенная безопасность и надежность.**
- **Упрощение систем управления.** Как следствие – снижение персонала вплоть до необслуживаемости
- **Возможность транспортабельности**
- **Эксплуатация в малых электрических сетях, удаленных зонах и вне сетей. Гибкая выработка энергии**
- **Продолжительные кампании (вплоть до срока службы АСММ)**
- **Минимизация масштабов и последствий аварий.** Как следствие, **обеспечение полной финансовой ответственности оператора** за возможный ущерб третьим лицам от аварии **при приемлемых затратах на ядерное страхование**
- **Промышленное производство** – «заводское качество» изготовления, монтажа, испытаний; минимизация кап.строительства на площадке размещения, **модульная сборка**

Атомная термо-электрическая станция теплоснабжения «Елена-АМ»

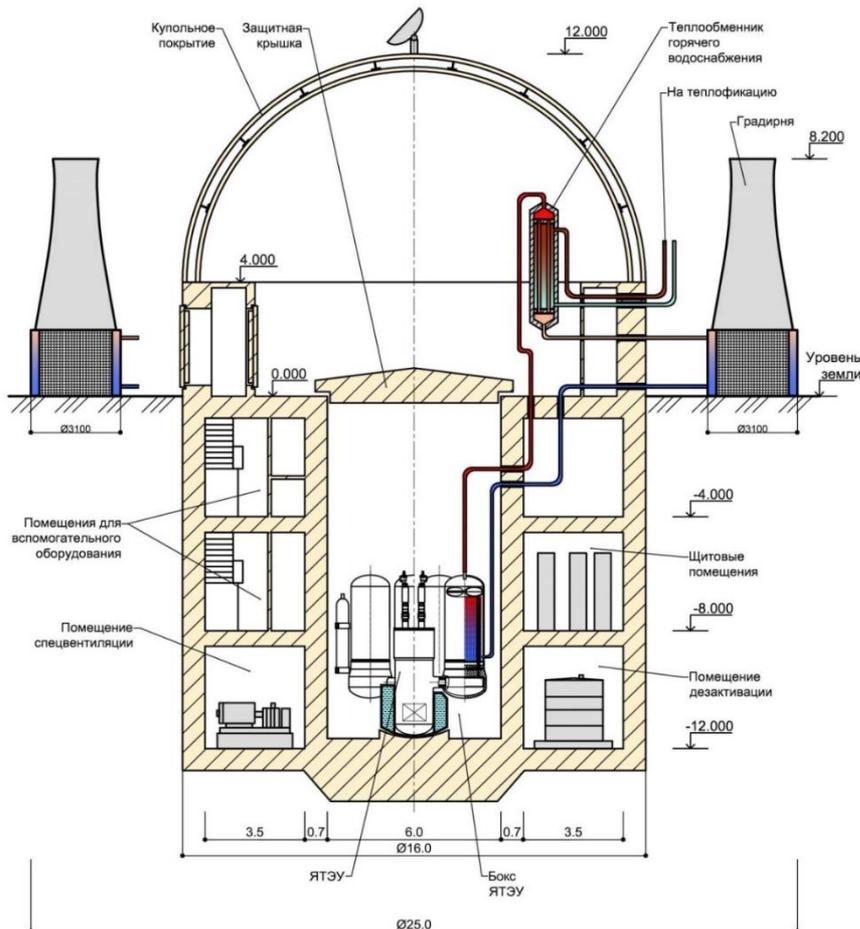


АТСТ «Елена-АМ» предназначена для выработки тепловой энергии на теплофикацию с дополнительной выработкой электроэнергии для собственных нужд и потребителей первой категории децентрализованного энергообеспечения отдаленных и труднодоступных регионов с дальнепривозным органическим топливом



Основные характеристики АТСТ «Елена-АМ»

В состав АТСТ входят: реакторная установка, термоэлектрическая установка, система теплоснабжения, система электроснабжения, автоматизированная система управления технологическим процессом, вспомогательные и обеспечивающие системы



Тепловая мощность – до 14 МВт

Электрическая мощность – до 400 кВт

Температура сетевой воды теплофикационной сети:

- в прямой магистрали – ~90 °С

- в обратной магистрали – ~70 °С

Режимы работы установки:

-слежение за электрической нагрузкой в диапазоне 100 – 20 – 100% от $N_{ном}$ ежедневно

-слежение за тепловой нагрузкой в соответствии с графиком отопительного сезона

Постоянный эксплуатационный персонал отсутствует.

Регламентные работы выполняются специализированной выездной бригадой один раз в год в течение до 2 недель.



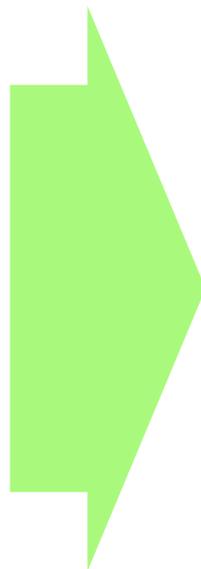
Реактор с саморегулированием мощности

(без вмешательства регулирующих органов и систем управления)

Безнасосная схема охлаждения

(естественная циркуляция теплоносителя в основных контурах)

Термоэлектрический метод преобразования тепловой энергии в электрическую



Отсутствие подвижных частей

Безопасность и надёжность

Необслуживаемость

Повышенный ресурс



1. Малая тепловая мощность реактора (не более 14 МВт), остаточные тепловыделения 50..100 Вт/л
2. Небольшое запасенное тепло ($T_{\text{топл.}} - T_{\text{воды}}$ не превышает 50 °С)
3. Отсутствие пароциркониевой реакции
4. Отсутствие в рабочем режиме реактора запаса реактивности, регулирование за счет плотностного эффекта
5. Отсутствие насосов и арматуры
6. Отсутствие персонала
7. Электробезопасность – ток короткого замыкания ТЭГ не может превышать двух номиналов

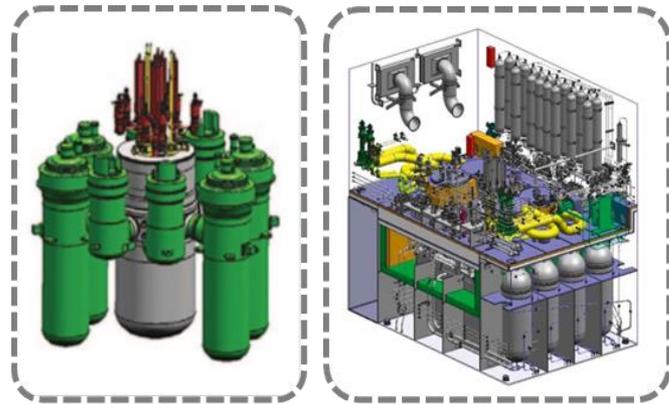
Простые и эффективные меры обеспечения безопасности



Реализация комплексного подхода:

- **Оценка потребностей заказчика**
- **Выработка требований к конкретной станции**
- **Создание институционального обеспечения:** правовое обеспечение, регулирование, безопасность, лицензирование, экология, противоаварийное планирование, физзащита и др.
- **Создание инфраструктуры:** проектирование, изготовление, строительство, монтаж, транспортировки, подготовка кадров и др.
- **Создание кооперации исполнителей и управление проектом**

Жизненный цикл судовых ЯЭУ



Проектирование РУ



Эксплуатация



Строительство РУ, судов и кораблей с ЯЭУ



Хранение и утилизация (Сайда губа)



АСММ – оптимальное решение для децентрализованного энергообеспечения удаленных труднодоступных потребителей

- 1. Снижение или полное устранение зависимости от ископаемых источников топлива**
- 2. Снижение или полное устранение логистического «бремени», необходимого для традиционных источников энергии**
- 3. Надежное функционирование**
- 4. Нечастые перегрузки топлива и техническое обслуживание**
- 5. Снижение численности персонала, с конечной целью полностью автоматической работы**
- 6. Транспортабельность, мобильность**

Применение научно-технической базы, накопленной за многолетний период создания и эксплуатации судовой атомной энергетики, должно стать основой для реализации инновационных АСММ



Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

«Обременения» атомной энергетики

Ядерная энергетика несет на себе бремя ограничений и более жестких требований, по сравнению с другими видами промышленной деятельности

- **Гарантии нераспространения**
- Требования по обеспечению **ядерной и радиационной безопасности**
- Жесткие процедуры **лицензирования**
- **Национальное регулирование** – наличие в стране ядерного законодательства и надзорного органа
- **Физзащита**
- **Противоаварийное планирование**
- Обеспечение **гражданской ответственности** за ущерб третьим лицам
- **Подготовка кадров**
- **Общественная приемлемость**
- **Экология**