



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

*Татарстанский международный форум по энергетике и
энергоресурсоэффективности ТЭФ-2023*

Производство водорода на атомной энерготехнологической станции (АЭТС)

Петрунин Виталий Владимирович

Первый заместитель генерального директора –
генерального конструктора АО «ОКБМ Африкантов»,
доктор технических наук, профессор, заслуженный конструктор РФ

Маров Игорь Викторович

Главный конструктор промышленных, высокотемпературных и исследовательских РУ
АО «ОКБМ Африкантов»

Фатеев Сергей Анатольевич

Начальник бюро технико-экономического сопровождения проектов и экономики
жизненного цикла РУ АО «ОКБМ Африкантов»

6 апреля 2023 года, г. Казань

- ✓ **История технологии ВТГР и АВЭ. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) – расширение сферы применения атомной энергии. Атомно-водородная энергетика в СССР.**
Почему так хорошо начавшееся развитие не нашло в прошлом веке масштабного продолжения?
- ✓ **Почему в мире наступает ренессанс Водородной энергетики? Вызовы XXI в. Мировые тренды и вектор технологического развития Госкорпорации «Росатом».**
Почему мы считаем, что Госкорпорация «Росатом» может стать локомотивом атомно-водородной энергетики, а Россия – лидером в реализации поставок водорода на мировой рынок?
- ✓ **Ключевые технологии ВТГР, разработанные в России. Технологии производства водорода.**
Какие НИОКРы и проекты ВТГР были выполнены за рубежом и в России?
- ✓ **Международное сотрудничество по водородной энергетике и ВТГР (1990-2000-е).**
Пример – Международный проект ГТ-МГР.
- ✓ **Инвестиционный проект АО «Концерн «Росэнергоатом». Проект АЭТС с ВТГР и ХТЧ.**
- ✓ **Какие уникальные результаты были продемонстрированы? Какие проблемные вопросы требуется решить?**
 - цели и дорожная карта НИОКРов, освоение и коммерциализации технологий крупномасштабного производства водорода;
 - по безопасности и нормативной базе;
 - по инфраструктуре водородной энергетики и интеграции в экономику;
 - по созданию опытно-промышленной станции для производства водорода (АЭТС);
 - по созданию полномасштабного производства водорода на горизонте 2030-2050 гг.;
 - по геологическому захоронению углекислого газа, вариантам утилизации и использования CO₂;
 - команда разработчиков, управление, общество.

АО «ОКБМ Африкантов» – научно-производственный центр атомного машиностроения Госкорпорации «Росатом»



Крупный научно-производственный центр Госкорпорации «Росатом» входит в контур управления АО «Атомэнергомаш»

Дата образования:

27 декабря 1945 г.

Награды:

1960 г. – Орден Ленина.

1985 г. – Орден Октябрьской Революции.



АО «ОКБМ Африкантов» – разработчик, изготовитель, комплектный поставщик ядерных энергетических установок и высокотехнологической продукции для смежных отраслей экономики.

Располагает многопрофильным конструкторским коллективом, собственной исследовательской, экспериментальной и производственной базой.



МИССИЯ – служить национальным интересам, разрабатывать и поставлять на рынок качественные высокотехнологичные решения и продукцию

Персонал	4 281 человек*
• конструкторы и технологи	1 142 человек
• инженеры-испытатели	142 человека
• рабочие и мастера	1 617 человек
• вспомогательные службы	1 293 человек
• руководство	87 человека
Средний возраст	43 года
Доля сотрудников до 35 лет	26 %
Сотрудники, имеющие ученые степени и звания	1 академик РАН
	17 докторов наук
	82 кандидата наук
	5 профессоров
Премии Правительства в области науки и техники	9 доцентов
	49 премий 102 лауреат
Заслуженные деятели науки и техники	70 человек

*Фактическая среднесписочная численность работников предприятия на 31.12.2022 г.

Правительством РФ приняты и утверждены основные документы на период до 2035 года и на перспективу до 2050 г., определяющие общие ориентиры, цели и задачи, стратегические инициативы, ключевые мероприятия по развитию водородной энергетики в России.

2019 г. – обоснование паспорта **ФП4 КП РТТНИ** до 2030 г. в части мероприятий по задаче *«Разработка технологий атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода»*.



Приказ Минэнерго РФ и Госкорпорации «Росатом» от 25.12.2019 № 30@/1/1472-П об утверждении инвестиционной программы АО «Концерн Росэнергоатом» на 2021-2025 гг., подписанный министром энергетики РФ Н.Г. Шульгиновым и генеральным директором Госкорпорации «Росатом» А.Е. Лихачевым.



Решение от 22.04.2020 № ИП-П.В.8.4.1-2020-1 о включении инвестиционного проекта «НИОКР по технологиям атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода» в инвестиционную программу капитальных вложений АО «Концерн Росэнергоатом», утвержденное первым заместителем генерального директора по операционному управлению Госкорпорации «Росатом» А.М. Локшиным.



Распоряжение правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-Р об утверждении Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года, подписанное председателем Правительства РФ М.В. Мишустиним.



Распоряжение правительства РФ от 05.08.2021 № 2162-Р об утверждении Концепции развития водородной энергетики РФ, подписанное председателем Правительства РФ М.В. Мишустиним.

Распоряжение правительства РФ от 16.01.2023 № 40-Р о соглашениях о намерениях между Правительством РФ и заинтересованными организациями в целях развития высокотехнологичного направления «Развитие водородной энергетики», подписанное председателем Правительства РФ М.В. Мишустиним

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА АО «Концерн Росэнергоатом»
«НИОКР по технологиям атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода»



Производство водорода

разработка документации на АЭТС с РУ ВТГР и ХТЧ, электролиз на АЭС, безопасность производства



Инфраструктура ВЭ

электрохимические устройства, система обращения, безопасность потребления



Интеграция в экономику

поставки водорода на рынок, пилотные проекты, меры господдержки, сотрудничество

Цель разработки

Создание крупномасштабного производства водорода на базе АЭТС с ВТГР методом паро-кислородной конверсии метана без выбросов в атмосферу диоксида углерода

Развитие направления ВТГР в России и в мире



Peach-Bottom



HTTR

В мире

Активное развитие с 60-х гг.

Англия	Dragon	1963 - 1976 гг.
Германия	AVR	1967 - 1988 гг.
США	Peach-Bottom	1967 - 1974 гг.
США	FSV	1976 - 1989 гг.
Германия	THTR-300	1984 - 1989 гг.
Япония	HTTR	1998 г. - н.в.

XX в.

В СССР / России

Программа «Водородная энергетика» в 70-80 гг.

Разработаны:

- технические проекты АЭТС с ВТГР: ВГ-400, ВГМ
- высокотемпературные материалы и керамическое топливо

Выпущено Постановление Совета Министров СССР №794-19 от 16.07.1987г. «О создании и внедрении в народное хозяйство атомных энерготехнологических комплексов на базе ВТГР»

Определено 5 площадок для создания АЭТС:

2 опытно-промышленные (г. Кирово-Чепецк, г. Димитровград); 3 промышленных (г. Котлас, г. Новополюцк, г. Нижнекамск).



Разработка проектов в различных странах

U-Battery	Польша	ANTARES	Франция
PBMR, ANTR-100	ЮАР	VHTR (NHDDP)	Корея
NGNP	США	GTHTTR 300	Япония

Активное развитие в Китае

АЭС «Шидаовань»	HTR-10	эксплуатация с 2003 г.
	HTR-PM (2×250 МВт)	физический пуск первого и второго реакторов (12.09. 2021/11.11.2021 г.)
	HTR-PM600 (6×250 МВт)	разработан проект ТЭИ по выбору площадки

В сентябре 2021 г. в Китае создан технологический Альянс по производству экологически чистого водорода с использованием ВТГР

(Университет Цинхуа, энергетическая корпорация China Huaneng Group, CNNC, крупнейшая государственная сталелитейная корпорация China Baowu Steel Group, инвестиционная корпорация China CITIC Group).

XXI в. Разработка проектов различного назначения

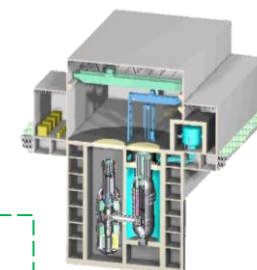
- ГТ-МГР (производство э/э с КПД 50%), разработка в кооперации с США)
- МГР-Т (производство э/э (с КПД 50%) и промышленное производство водорода)
- RDE – экспериментальный реактор для Республики Индонезии

Проведено 5 НТС Минатома

2 НТС АО «Концерн «Росэнергоатом»

около 100 совещаний международных РГ и Руководящего комитета по проекту ГТ-МГР

Накопленный опыт и знания позволяют Госкорпорации «Росатом» создать собственную конкурентоспособную технологию производства водорода на базе АЭТС с ВТГР и ХТЧ



РУ ГТ-МГР

Компетенции и опыт по ВТГР

Экспериментальная база

(ОКБМ, ЛУЧ, НИИАР и др.)

более 80 стенов

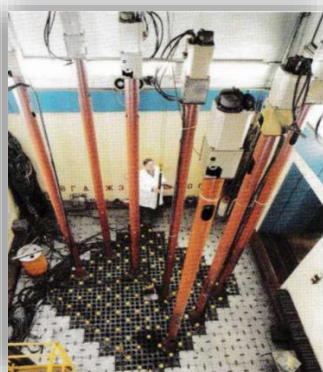
(сохранилось ~20%)



СТ-1312 (мощность 15 МВт)



Критический стенд
«Астра»



Критический стенд
«Грог»

Ключевые проекты ВТГР, разработанные ОКБМ

Период, гг.	Проект	Мощность, МВт	T _{гелия} , °C	Назначение	Этап	Заказчик
1974 - 1987	ВГ-400	1 060	950	электроэнергия и тепло для	ТП	Министерство среднего машиностроения
1986 - 1991	ВГМ	200	750 / 950	производства аммиака	ТП	
1990 - 1996	ВГМ-П	215	750	тепло для НПЗ	ПТ	Министерство атомной энергетики и промышленности
1993 - 2013	ГТ-МГР	600	850	электроэнергия с КПД 50%	ЭП	Минатом России, General Atomics (США)
2003 - 2004	МГР-Т	600	950	тепло, электроэнергия, водород	ПТ	АО «Концерн «Росэнергоатом»
2016 - 2018	RDE	10	700	экспериментальный реактор	ТП	АО РАОС (для Республики Индонезии)
с 2021 по н.в.	АЭТС	4×200	850	водород, аммиак, метанол, карбамид	Разработка ТП	АО «Концерн «Росэнергоатом»

Топливо

Разработано на основе микротвэлов с керамическим покрытием. Изготовлено ~ **55 000 шт. шаровых твэлов**. Проведены стендовые и реакторные испытания (АО «ГНЦ НИИАР»), выпущено ТУ на шаровой твэл. Изготовлено **350 образцов топливных компактов (твэл)** на лабораторной установке АО «НПО «Луч».

Высоко-температурные материалы

Разработан **радиационно стойкий графит** с требуемыми физико-механическими свойствами. Созданы **высокотемпературные (до 950°C) металлические материалы**, Проведены испытания на базе ~10 тыс. часов.

Системы и оборудование

Испытаны **опытный образец ГЦК, экспериментальная модель теплообменника, гелиевые газодувки, модель парогенератора, приводы СУЗ** и пр. оборудование

Ключевые характеристики АЭТС

Технические требования к АЭТС (ТТ ВУ)	1 блок	4 блока
Производительность по водороду (с учетом КИУМ 0,9), тыс. тонн/год	110	440
Чистота производимого водорода (величина может быть снижена по требованию Заказчика), %	99,99	
Тепловая мощность ВТГР, МВт	200	800
Потребление природного газа, тыс. тонн/год	376	1 504
Потребление кислорода, тыс. тонн/год	300	1200
Потребление воды на химическую реакцию производства H ₂ , тыс. тонн/год	470	1 880
CO ₂ на утилизацию, тыс. тонн/год	972	3 900
Обеспечение электроэнергией/мощность потребителей электроэнергии с РУ и ХТЧ (из внешней сети), МВт _э	50	200
Обогащение топлива по U ²³⁵ , %	Не более 20	
Проектный срок службы, лет	60	
Целевой показатель по себестоимости производства водорода для серийной АЭТС, \$/кг	2	

Основание

Договор от 21.04.2021 № 9/156570-Д с АО «Концерн Росэнергоатом» на выполнение НИОКР по теме: «Разработка технологий атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода: НИОКР по разработке технологических решений для создания атомной энерготехнологической станции с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором и химико-технологической частью для производства водорода».

Цель разработки

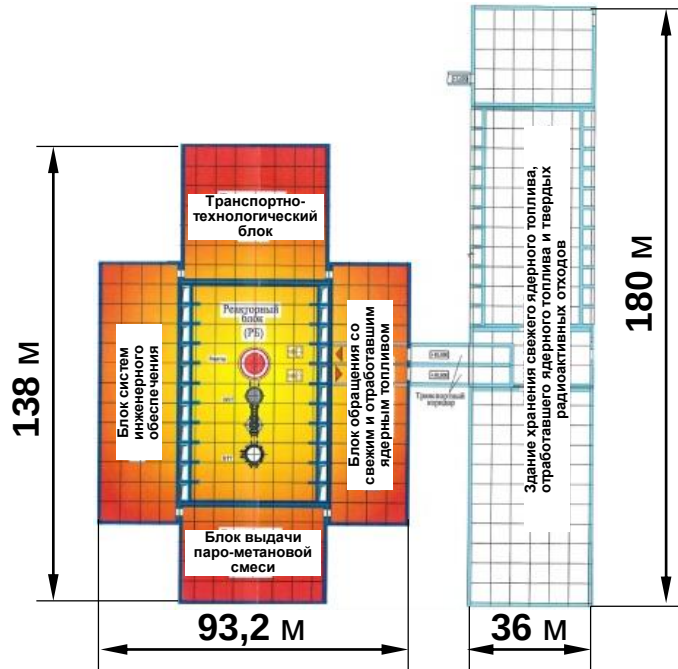
Создание крупномасштабного производства водорода на базе АЭТС с ВТГР методом парокислородной конверсии метана без выбросов в атмосферу диоксида углерода.

Первый блок головной станции опытно-демонстрационный:

- ✓ демонстрация масштабного производства водорода без выбросов диоксида углерода в атмосферу;
- ✓ подтверждение безопасной интеграции ВТГР с химико-технологической установкой производства водорода;
- ✓ получение опыта лицензирования нового типа атомных станций в сфере энерготехнологического применения.

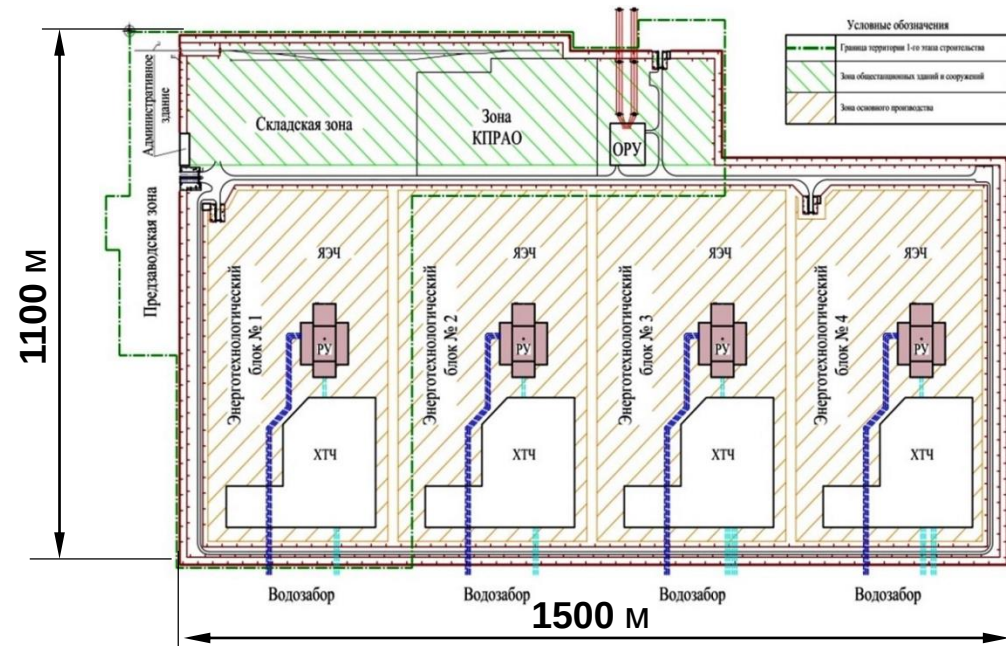
Результаты предпроектных проработок по АЭТС

Компоновка здания реакторной установки

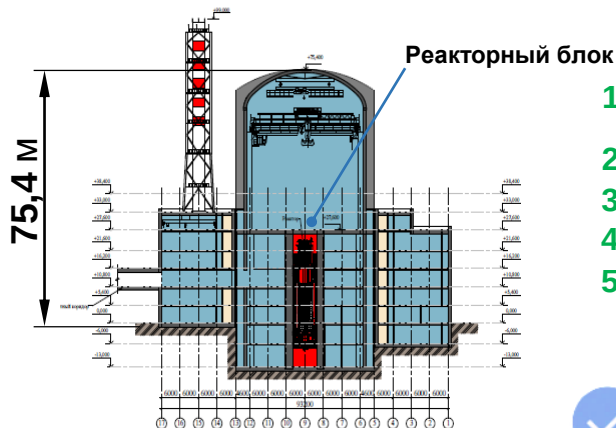


Площадь территории площадки – 165 Га
Площадь застройки – 30,1 Га

Предварительная схема генерального плана головной АЭТС с ВТГР и ХТЧ



Результаты проработки основных архитектурных компоновочных решений по зданиям РУ и вспомогательным зданиям

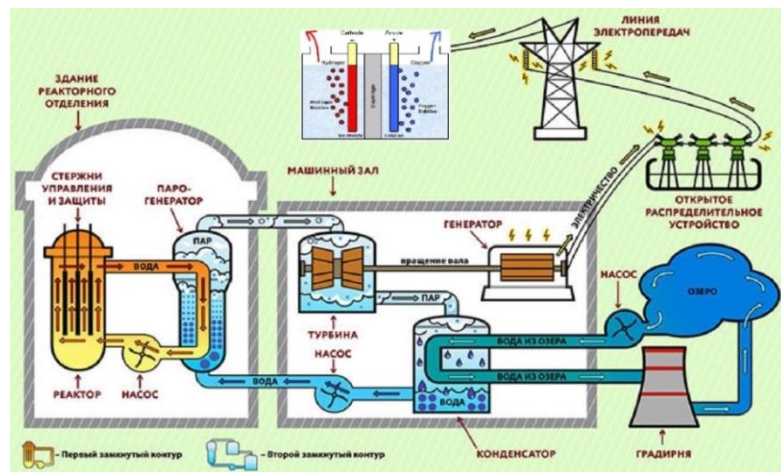
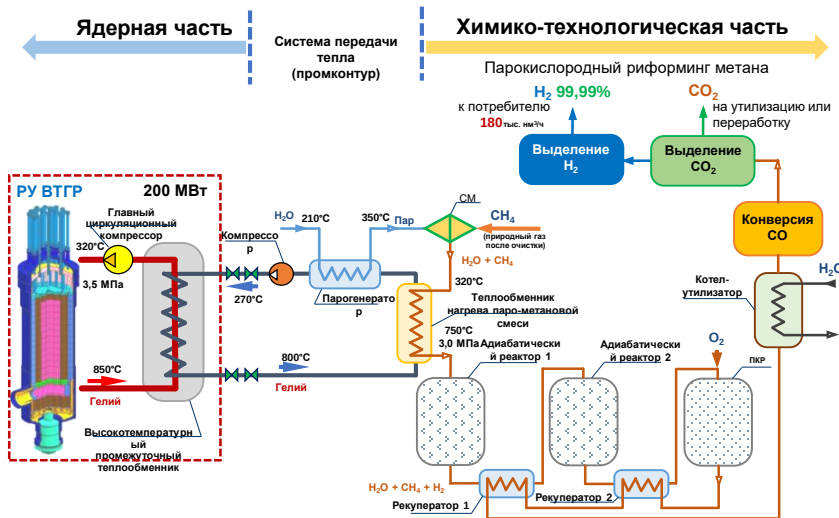


- 1 Габариты зданий РУ приняты на основании компоновочных решений по размещению технологического оборудования.
- 2 Здание РУ – шестиэтажное с подвальным этажом. Габариты здания 93,2 × 138 м.
- 3 Площадь застройки здания – 10,5 тыс. м².
- 4 Строительный объем здания – 490,1 тыс. м³.
- 5 В состав здания входят функционально-технологические блоки: реакторный блок, блок обращения со свежим и отработавшим ядерным топливом; блок выдачи паро-метановой смеси; транспортно-технологический блок; блок систем инженерного обеспечения



Размещение зданий и сооружений на площадке ЯЭЧ принято с учетом радиусов воздействия ударной волны взрывоопасных объектов ХТЧ

Эффективность использования тепловой энергии для получения водорода на ВВЭР и ВТГР



ПКМ на базе четырехблочной АЭС с ВТГР-200

Производительность АЭС по H_2 – **0,44** млн т/год
Тепловая мощность АЭС – **800** МВт (**14,3** кВт·ч на 1 кг H_2)
Электроэнергия на собственные нужды АЭС – $4 \times 50 =$ **200** МВт (**2,96** кВт·ч/кг H_2)
КПД энергоснабжения АЭС от АЭС с ВВЭР-1200 – **37,5** %
Расчетный КИУМ – **0,9** (7884 ч)

Используемое тепло для производства водорода:

$$N_{Т\text{ АЭС}} + N_{с/н} / \text{КПД}_{эл/сн} = 800 \text{ МВт} + 4 \times 50 \text{ МВт} / 37,5 = \mathbf{1333 \text{ МВт}}$$

Затраты тепловой энергии ВТГР на 1 кг водорода:

$$1333 \text{ МВт} \times 7884 \text{ ч} / 0,44 \text{ млн тонн} = \mathbf{23,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}$$

Электролиз на базе трехблочной АЭС с ВВЭР-1200

Тепловая мощность АЭС – $3 \times 3200 =$ **9600** МВт
Электрическая мощность АЭС – $3 \times 1200 =$ **3600** МВт, КПД – 37,5%
Потребление электроэнергии на 1 кг H_2 – **55** кВт·ч
(**50** кВт·ч электролизер + **5** кВт·ч системы обслуживания; КПД – **65**%)
Расчетный КИУМ – **0,9** (7884 ч)
Электроэнергия на собственные нужды АЭС – **6,5**%
Выработка электроэнергии – $3600 \text{ МВт} \times 7884 \text{ ч} \times 0,935 =$ **26,5** млрд кВт·ч
Производительность комплекса по H_2 – $26,5 / 55 =$ **0,48** млн тонн/год

Затраты тепловой энергии ВВЭР на 1 кг водорода:

$$9600 \text{ МВт} \times 7884 \text{ ч} / 0,48 \text{ млн тонн} = \mathbf{157,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}$$

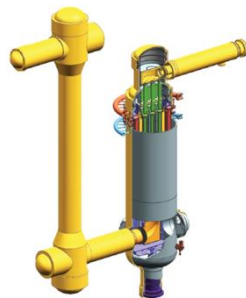
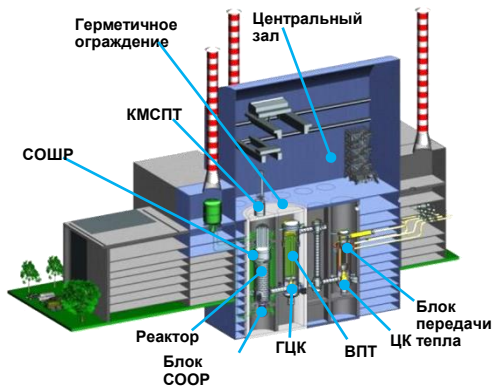
Отношение затрат тепловой энергии ВВЭР к ВТГР:

$$\mathbf{157,7 / 23,9 = 6,6}$$

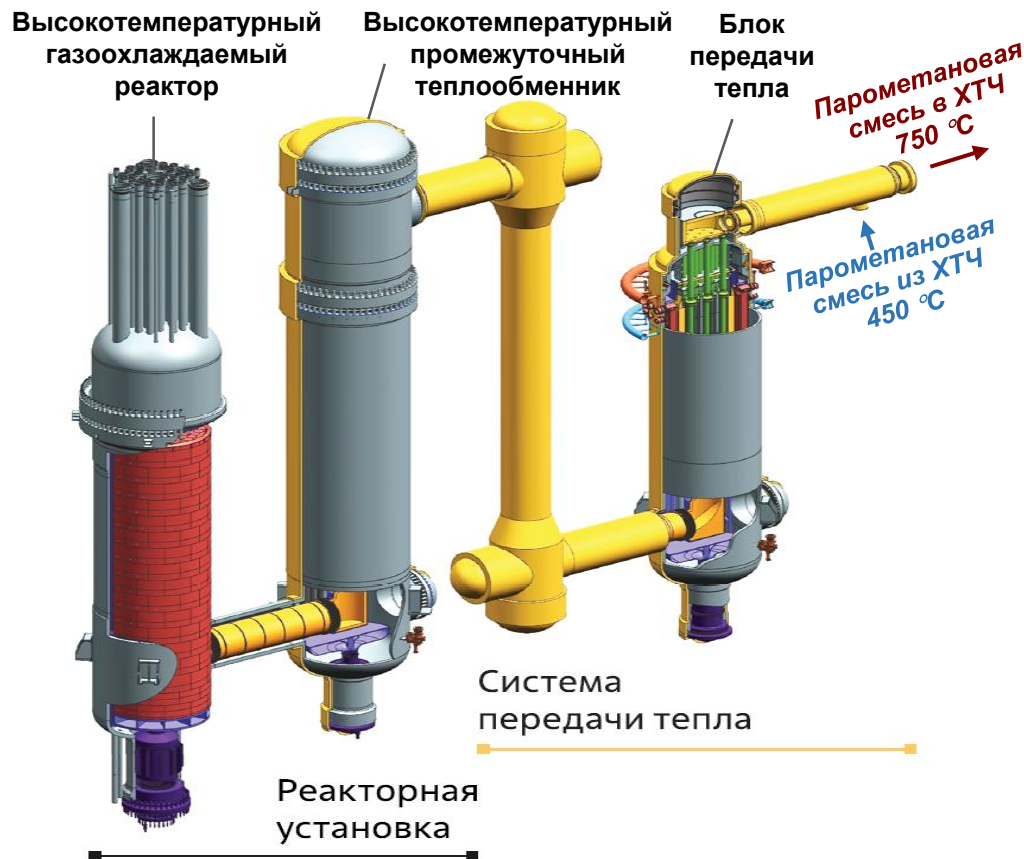
Эффективность использования тепла для производства H_2 методом ПКМ от ВТГР выше в **6,6** раза по сравнению с электролизом от ВВЭР (с КПД = 65% по электролизерам)

В перспективе при доведении КПД электролизеров до **80%** (**42** кВт·ч/кг H_2) эффективность ВТГР снизится до **5,5** раз

ОКБМ
АФРИКАНОВ
РОСАТОМ



Реакторная установка ВТГР и система передачи тепла



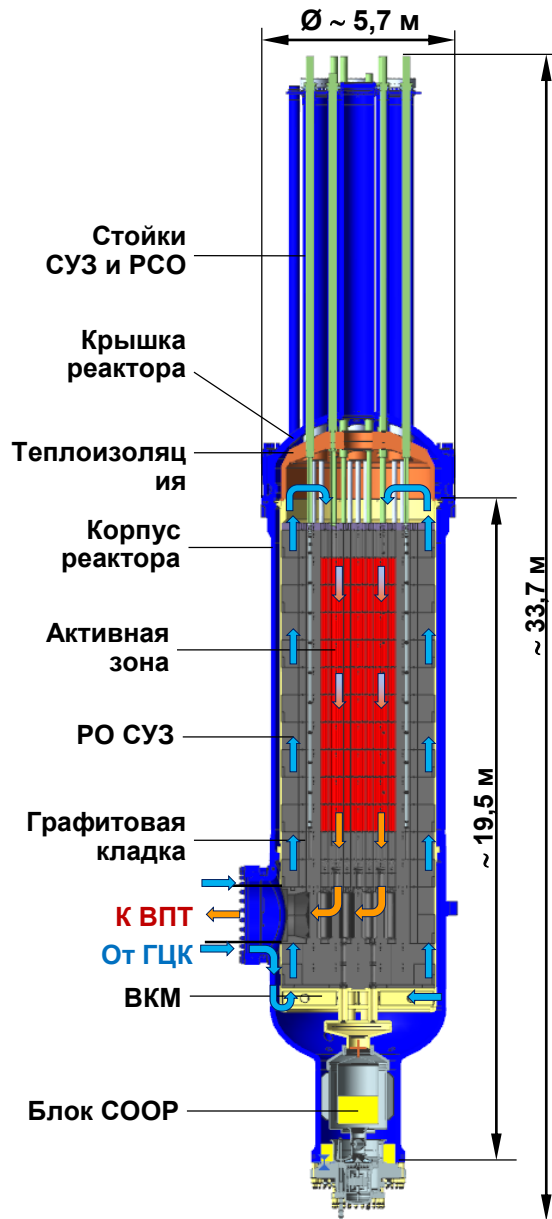
Компоновка ядерной части АЭТС и системы передачи тепла

Основные проектные положения

- ✓ Назначение РУ – генерация высокотемпературной тепловой энергии для передачи в химико-технологическую часть (ХТЧ)
- ✓ Обогащение топлива по U^{235} не более 20%
- ✓ Интеграция ядерной и химико-технологической частей АЭТС с помощью системы передачи тепла (промежуточного гелиевого контура)
- ✓ Производство водорода в ХТЧ методом парокислородной конверсии метана
- ✓ Применение технических решений, освоенных отечественной промышленностью, использование отечественной производственной базы
- ✓ Определение перспективных направлений НИОКР для последующей оптимизации проектных решений
- ✓ Специфические особенности реакторной установки ВТГР, обеспечивающие безопасность, позволяют размещать АЭТС в непосредственной близости к потребителю
- ✓ Первый блок головной станции является опытно-демонстрационным

Характеристика	1 контур	2 контур	ХТЧ
Теплоноситель	Гелий	Гелий	Парометановая смесь
Температура, °C	850	800	750
Давление (абс), Мпа	4,0	4,2	3,24

Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор

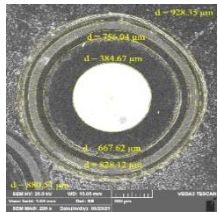
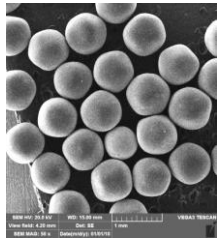


Основные технические решения

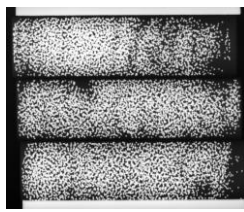
- ✓ Корпус для реактора мощностью 200 МВт возможно изготовить на российских предприятиях
- ✓ Теплоноситель (**гелий**) – инертный газ, не активизируется, не имеет фазовых переходов
- ✓ Материал активной зоны (**графит**) обеспечивает её конструкционную стабильность во всех аварийных ситуациях с повышением температуры
- ✓ Топливо (**микрочастицы с керамическими покрытиями**) термо- и радиационно стойкое
- ✓ Конструкция и компоновка реактора обеспечивают необходимый отвод остаточного тепла от а.з. в аварийных режимах пассивным образом через корпус реактора к системе охлаждения шахты реактора

Основные характеристики	Значение
Тепловая мощность, МВт	200
Теплоноситель	Гелий
Расход теплоносителя через реактор, кг/с	73,7
Давление гелия на напоре ГЦК (абс.), МПа	4,0
Температура гелия на входе в реактор, °С	330
Температура гелия на выходе из реактора, °С	850
Максимальный флюенс нейтронов с $E > 0,1$ МэВ на корпус реактора за сок службы, м^{-2}	$2,7 \cdot 10^{22}$
Максимальная температура корпуса реактора в режиме НЭ, °С	350
Максимальная температура корпуса реактора при ННЭ, °С: – для аустенитного варианта исполнения корпуса – для перлитного варианта исполнения корпуса	450 420 (100 часов)
Материал корпуса	08X18H10T/ 15X2МФА-А
Масса реактора, т	~ 1 000

НИОКР по разработке технологии производства топлива



Микротвэлы
(изготовлены в 2021 г.
АО ВНИИНМ)



ТВЭЛы
(изготовлены в 2021 г.
АО «НИИ НПО «Луч»)

Необходимость НИОКР обусловлена

1. **Отсутствием установок по производству микротвэлов**, использовавшихся для изготовления топлива ВГМ (старые установки выведены из эксплуатации).
2. **Изменением характеристик микротвэлов** (диаметр зерна, обогащение, толщины слоев покрытий изменены для достижения более высоких выгораний по сравнению с ВГМ).
3. **Изменением технологии изготовления кернов** (прежняя технология не позволяет изготавливать керны меньшего диаметра).
4. **Изменением конструкции твэлов** (применен цилиндрический твэл вместо шарового).

Результаты работ 2021 г. ФГУП «НИИ НПО «Луч»

1. В ноябре 2021 г. облучательное устройство с экспериментальными микротвэлами (МТ) и твэлами проектного обогащения загружены в исследовательский реактор **ИВВ.2М** (АО «ИРМ»).
2. Планируется проведение ресурсных реакторных испытаний **экспериментальных твэлов и микротвэлов** в реакторе **СМ-3** (АО «ГНЦ НИИАР»).



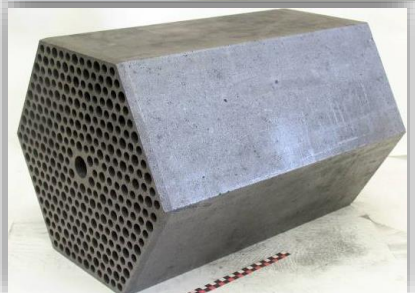
Совместная работа специалистов НПО «ЛУЧ» и ИРМ по сборке облучательного устройства



Подготовка облучательного устройства к загрузке в реактор



Для отработки и аттестации технологии опытно-промышленных твэлов требуется создание опытно-промышленной линии заданной производительности



Образцы экспериментального графита

Опыт и компетенции

1. Результаты НИОКР, выполненных в 70-е гг., показали, что графит, применяемый для кладки реакторов РБМК, не обеспечивает ресурсные характеристики в диапазоне температур до 1200°C и флюенсе до $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$.
2. Во всех ранее разработанных проектах российских проектов ВТГР был применен графит ГР-1 (АО «НИИГрафит») с использованием композитного наполнителя на основе кокса КНПС (кокс нефтяной пиролизный специальный), обеспечивающего необходимые ресурсные характеристики. Производство данного кокса на российских предприятиях было прекращено в 1993 г.
3. В рамках проекта ГТ-МГР 2009-2011 гг. были начаты исследования по графиту на новом сырье (пековый кокс на основе каменноугольного пека, поставщик АО «НИИГрафит» совместно с ЗАО «Технографит»). В реакторе СМ-3 (АО «ГНЦ НИИАР») графит был облучен до промежуточного флюенса $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ($E \geq 0,18 \text{ МэВ}$) в среде гелия при температуре от 800 до 1250°C. Дальнейшие испытания графита были приостановлены в связи с приостановкой финансирования проекта ГТ-МГР.

Результаты работ 2021 г.

1. АО «НИИГрафит» изготовлены образцы экспериментального графита и герметизированных (клееных) соединений графита марок МИГ-1, МИГ-2, МИГ-3.
2. АО «ГНЦ НИИАР» проведены дореакторные исследования образцов экспериментального графита и герметизированных соединений графита, характеристики соответствуют требованиям ТЗ.
3. Старт реакторных испытаний в реакторе СМ-3 (АО «ГНЦ НИИАР»).



ЦЕЛЬ НИОКР

- получение реакторного графита по технологии изостатического прессования с улучшенными показателями изотропии, а также пониженным содержанием примесей в графите;
- аттестация нового материала.





Материал	Статус	Применение	Изготовители
Сталь 12X18H10T 08X18H10T	Аттестована до 600°C	Внутрикорпусные металлоконструкции, блок корпусов	ПАО «Мечел», АО «Металлургический завод «Электросталь»
Сталь 15X2МФА-А	Аттестована до 350°C	Блок корпусов	АО «АЭМ-технологии» (филиал Атоммаш) и др.
Сплав ХН55МВЦ (ЧС-57)	Требуется доаттестация	Облицовка теплоизоляции в горячем газоходе трубная система ВПТ, ВТТ	ООО «ОМЗ-Спецсталь», ООО «ТМК-ИНОКС», АО «Корпорация «Красный октябрь», «Ашинский металлургический завод», ПАО «Русполимет»

ЗАДАЧИ НИОКР

- отработка технологии изготовления требуемого сортамента из жаропрочного сплава ХН55МВЦ (ЧС57);
- отработка технологии сварки жаропрочного сплава ХН55МВЦ (ЧС57) требуемого сортамента, разработка проекта стандарта Госкорпорации «Росатом» на сварку и контроль качества сварных соединений;
- получение характеристик длительной прочности (до $5,0 \cdot 10^5$ часов);
- проведение аттестационных испытаний (до $t = 950^\circ\text{C}$), сплава марки ХН55МВЦ (ЧС57) и его сварных соединений.

Жаропрочный **никелевый сплав ХН55МВЦ (ЧС57)** разработан для использования в реакторных установках ВГ-400 и ВГМ. Проведены испытания на базе ~10 тыс. ч.

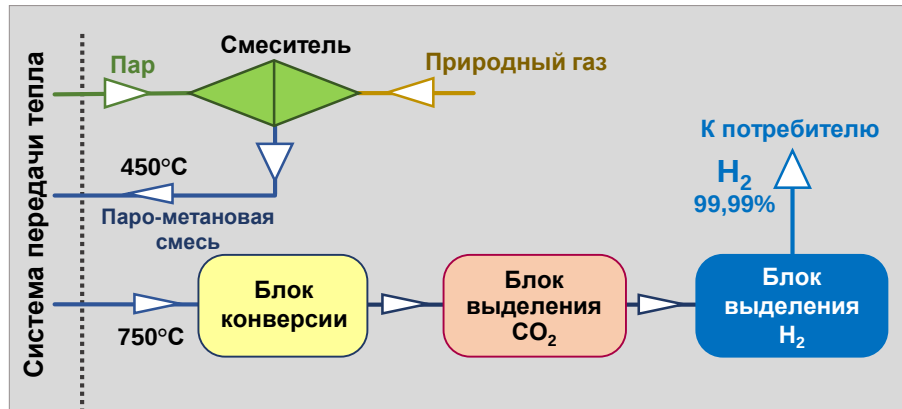
В настоящее время отсутствуют данные, подтверждающие ресурс **сплава ХН55МВЦ (ЧС57)** на не менее 20 лет в условиях эксплуатации ВТГР.

Имеются ограничения по освоенному сортаменту. **Отсутствует:**

- технология изготовления требуемых полуфабрикатов;
- технология сварки в необходимом сортаменте полуфабрикатов.

Сплав не включен в приложение № 1 к Сводному перечню документов по стандартизации «Перечень основных материалов ...»





Упрощенная схема ХТЧ



Лабораторная стендовая установка (ЛСУ)

пуск 15 ноября 2021 г. - производительность $\sim 1,5 \text{ м}^3 \text{ H}_2/\text{час}$

Преимущества технологии ХТЧ с ВТГР

- ✓ **Исключение сжигания природного газа:** нагрев паро-метановой смеси гелием в высокотемпературном теплообменнике
- ✓ **Минимизация расхода природного газа:** на производство 1 кг водорода требуется 2,6 кг природного газа вместо 3,5 кг.
- ✓ **Высокая эффективность конверсии метана:** преобразование 99,7% метана в водород за один технологический цикл – вместо 70-80%.
- ✓ **Максимальная локализация на территории РФ всей цепочки производства водорода:** научно-исследовательской и производственной базы, технологий, оборудования и сырья

Назначение лабораторной стендовой установки (ЛСУ):

- ✓ демонстрация технологии производства H_2
- ✓ отработка технологических режимов
- ✓ проверка работоспособности катализаторов паровой конверсии метана
- ✓ оптимизация технологической схемы генерации водорода

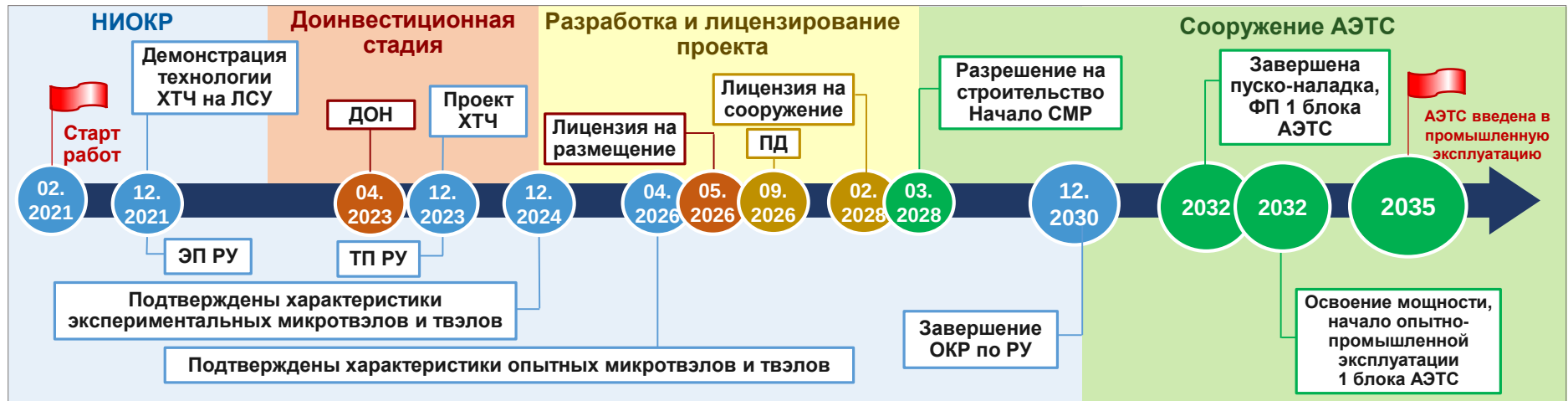
В ходе НИОКР на ЛСУ и ОДУ проводятся работы по определению взаимосвязей критериев подобия, параметров гидродинамики, критериев устойчивости процесса, зависимости стеночных эффектов, масштабных уравнений, **которые позволят спроектировать ХТЧ для АЭТС без создания промежуточных установок.**

Кооперация при выполнении НИОКР по АЭТС



Инвестиционный проект выполняет команда конструкторских, проектных и научных организаций, обладающих необходимыми компетенциями и практическим опытом реализации крупных проектов

Дорожная карта создания АЭТС с ВТГР и ХТЧ



Статус работ по АЭТС и реакторной установке

- Разработаны предпроектные материалы АЭТС
- Завершается разработка технического проекта РУ и системы передачи тепла.
- Проведен ряд ключевых НИОКР по материалам и элементам реактора. Изготовлены и испытаны в условиях реакторных/внеректорных испытаний опытные образцы топлива, конструкционные материалы
- Совместно с ФБУ «НТЦ ЯРБ» (Ростехнадзор) обеспечивается формирование нормативной базы проекта. Создана межотраслевая рабочая группа по НД. Определен перечень НД, требующих корректировки/разработки
- Проведены работы по верификации расчётных кодов. При проектировании используется широкий спектр САПР

Статус работ по ХТЧ

- Разработана и оптимизирована по результатам исследований технологическая схема ХТЧ для производства водорода методом паро-кислородной конверсии метана с преобразованием метана в водород за один цикл.
- Выполнены предпроектные проработки установки получения водорода, являющейся ХТЧ АЭТС
- Введена в действие лабораторная стендовая установка (ЛСУ) по производству водорода для отработки принятых технологических решений.

Освоение производства ТВС



Изготовление комплекта ТВС для первоначальной загрузки а.з. головной РУ



Организация работ по нормативному обеспечению АЭТС с ВТГР

Состав межотраслевой рабочей группы

АО «Концерн
Росэнергоатом»

АО ОКБМ «Африкантов»

ФБУ «НТЦ ЯРБ»

АО «НИИ НПО «Луч»

Генеральный
проектировщик

Институт технической
физики

Научный руководитель

Головная материало-
ведческая организация

АО «ВНИИНМ»

АО «НИИГрафит»

АО «Гиредмет»

Межотраслевая рабочая группа

создана Распоряжением Госкорпорации «Росатом» от 18.07.2022 №1-8/458-Р

Задачи

- анализ достаточности законодательства РФ, требований федеральных норм и правил
- обеспечение формирования нормативной базы для разработки проекта АЭТС

29.03.2022 стартовое совещание МРГ
12.04.2022 совещание в Ростехнадзоре
19.07.2022 второе совещание МРГ
06.10.2022 третье совещание МРГ
14.11.2022 совещание в Ростехнадзоре

Привлечено ФБУ «НТЦ ЯРБ»

2021 Выполнен предварительный анализ проекта РУ на соответствие нормативным требованиям. Показана возможность применения требований большинства ФНП.

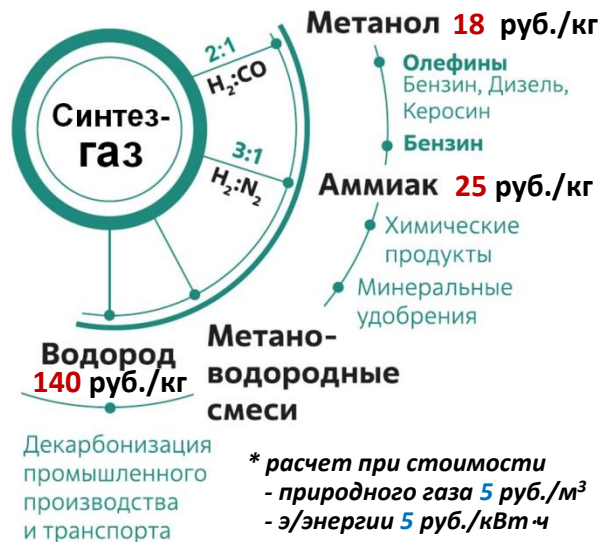
2022 Проанализированы принятые для РУ ВТГР технические решения и мероприятия по обеспечению безопасности, перечень исходных событий ПА, перечень ЗПА, перечень режимов работы. Сформулированы предложения по доработке проектных решений на этапе технического проекта. Разработаны предложения по внесению изменений /дополнений в ФНП, с целью учета особенностей конструкции и эксплуатации РУ ВТГР в составе АЭТС, сформулированы предложения по разработке новых ФНП

2023 Запланирован анализ материалов ТП РУ и предпроектных проработок АЭТС, оценка анализа несоответствий ТП РУ ВТГР требованиям НД, разработка предложений по нормативному регулированию в отношении АЭТС с РУ ВТГР и ХТЧ

Сформированы предложения по корректировке (разработке) НД:

- **корректировка:** НП-001-15, НП-004-08, НП-010-16, НП-082-07, НП-084-15, НП-089-15, НП-104-18, НП-105-18 и др.
- **разработка:** Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомных станций с ВТГР;
Требования безопасности при обращении с водородсодержащими смесями на ОИАЭ

Себестоимость* линейки продуктов АЭТС



Цена линейки продажи продуктов АЭТС, руб. /кг без НДС с учетом дисконтирования 7%

Значения

- Водород	250-280
- Аммиак	45-50
- Метанол	32-36

Факторы, влияющие на экономические показатели:

- ✓ объем производства (количество блоков АЭТС)
- ✓ номенклатура производимой продукции (только водород или расширенная линейка)
- ✓ площадка размещения (удаленность от потребителя / затраты на транспортировку, необходимость хранения)

ДОСТОИНСТВА ТЕХНОЛОГИИ ХТЧ

Значения на
1 блок ВТГР в
ценах 2022 г.

- ✓ **Исключение сжигания ценного сырья** метана ($1,1 \text{ кг}_{CH_4}/\text{кг}_{H_2}$) за счет нагрева ПМС гелием без выделения CO_2 – вместо сжигания метана с выделением CO_2 (до **0,8** млрд. руб./год при CH_4 5 руб./м³).

$$1,1 \text{ кг}_{CH_4}/\text{кг}_{H_2} \times 110 \text{ тыс. тонн } H_2/\text{год} \times 5 \text{ руб./м}^3_{CH_4} / 0,716 \text{ кг}_{CH_4}/\text{м}^3 \times 0,95 \text{ (содержание метана в природном газе)}$$
- Минимизация расхода природного газа** на производство водорода: **2,6** кг CH_4 на 1 кг H_2 вместо **3,7** кг.
- ✓ **Высокая эффективность конверсии метана (99,7%)** в водород с чистотой **99,99%** за один технологический цикл вместо **70-80 %**.
- ✓ **Отсутствие выбросов CO_2 в атмосферу** за счет технологии длительного хранения. Затраты энергии на адсорбцию CO_2 ниже по сравнению с технологией улавливания дымовых газов.
- ✓ **Снижение количества CO_2 на утилизацию** на **2,7** кг CO_2 /кг H_2 (с **9,5** кг CO_2 /кг H_2 для ПКМ до **6,8** кг CO_2 /кг H_2 для АЭТС).
- ✓ **Снижение CAPEX на установку по утилизацию CO_2** (за счет меньшего объема утилизации CO_2) до **6,85** млрд. руб. (по ИД ПАО «ЛУКОЙЛ 100 млн. \$ за утилизацию 300 тыс. тонн CO_2 /год).

$$2,7 \text{ кг}_{CO_2}/\text{кг}_{H_2} \times 110 \text{ тыс. тонн } H_2/\text{год} \times (100 \text{ млн. \$} \times 69,11 \text{ руб./\$} / 300 \text{ тыс. тонн } CO_2/\text{год})$$
- ✓ **Снижение OPEX по утилизации CO_2** более **1** млрд. руб./год

$$[30 \text{ \$}/\text{т выделение } CO_2 + 12 \text{ \$}/\text{т транспортировка } CO_2 \text{ на } 300 \text{ км} + 10 \text{ \$}/\text{т захоронение и мониторинг } CO_2] \times 2,7 \text{ кг}_{CO_2}/\text{кг}_{H_2} \times 110 \text{ тыс. тонн } H_2/\text{год} \times 69,11 \text{ руб./\$}$$
- ✓ **Максимальная локализация производства водорода на территории РФ:** научно-исследовательская и производственная базы, технологии, оборудование и сырье.

- ✓ Развитие водородной энергетики имеет поддержку на государственном уровне
- ✓ Одним из ключевых разработчиков водородной энергетики на основе использования ядерной энергии является Госкорпорация «Росатом»
- ✓ Крупномасштабное производство водорода возможно на базе использования тепла от ВТГР на базе российских технологий, знаний и опыта разработок в 70- 90х годов прошлого века
- ✓ Определены основные принципы, характеристики и технология необходимые для реализации проекта АЭТС с ВТГР и ХТЧ для производства водорода
- ✓ Применены отечественные технологии, приняты технические решения, реализуемые с использованием отечественной производственной базы
- ✓ Для перехода к инвестиционной фазе проекта необходимо взаимодействие с потенциальными крупными потребителями водорода и выбор перспективных площадок для размещения АЭТС

Спасибо за внимание!



603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15
Тел. (831) 275-40-76, (831) 275-26-40. Факс (831) 241-87-72.
E-mail: okbm@okbm.nnov.ru ,
официальный сайт: www.okbm.nnov.ru

6 апреля 2023 года, г. Казань