



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с применением рекомбинаторов водорода: нерешенные задачи

Забабахинские научные чтения 2025

Автор: Безгодов Евгений Витальевич

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

Актуальность



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

1. Самый распространенный в мире тип реакторов на атомных электростанциях (АЭС) – легководные реакторы с циркониевыми оболочками ТВЭЛОВ.
2. Существует опасность возникновения и развития тяжелых аварий с осушением активной зоны и выхода больших количеств водорода ($1 \text{ т H}_2 / 1 \text{ ГВт}$).
3. Взрыв водородно-паровоздушных смесей может привести к потере целостности герметичной оболочки и выбросу образовавшихся радиоактивных продуктов за пределы АЭС.
4. Для исключения таких последствий и обеспечения водородной взрывобезопасности применяют пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ).
5. Задача обоснования H_2 безопасности – найти характеристики работы ПКРВ для определения их количества и мест расположения на АЭС в целях недопущения накопления и воспламенения взрывоопасных смесей.



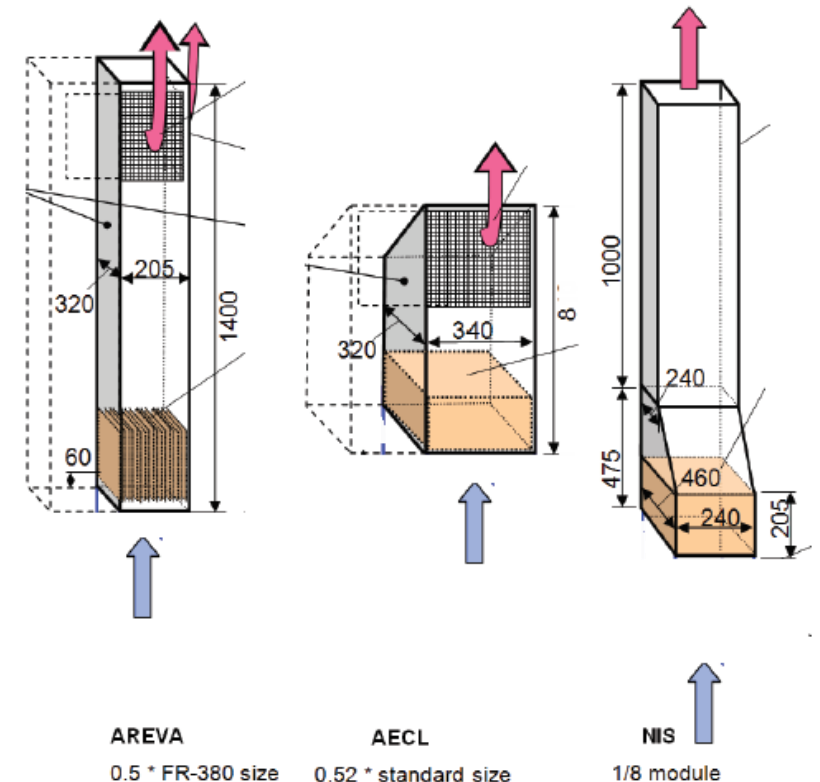
Взрыв водородно-паровоздушной смеси на одном из блоков на АЭС Фукусима в 2011 г.

Конструкция и характеристики ПКРВ

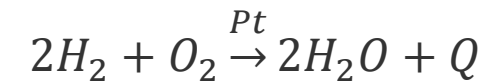


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

1. Конструкция – металлический короб с окнами, внизу короба – катализатор. Пассивный запуск за счет «каминного» эффекта при разогреве.
2. Характеристики:
 - A. Старт** – концентрация H_2 , при которой ПКРВ начинает работать.
 - B. Время выхода на режим** – время «разгона» до нормальной работы.
 - C. Производительность** – массовая скорость удаления водорода.
 - D. Предел беспламенной работы ПКРВ (предел поджига)** – условия, при которых смесь воспламеняется из-за работы ПКРВ.



Зарубежные модели ПКРВ [1]



[1] – S. Gupta, T. Kanzleiter, G. Poss. Passive autocatalytic recombiners (PAR) induced ignition and the resulting hydrogen deflagration behavior in LWR containment. – NURETH- 16, 2015, At Hyatt Regency Chicago. – Chicago, IL, USA.

Цели и задачи работы



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Цель:

Выбор направлений для исследований работы ПКРВ в целях повышения водородной безопасности на российских АЭС с ВВЭР.

Задачи:

1. Обзор исследований работы ПКРВ.
2. Анализ отечественных работ, определение «белых пятен»;
3. Предложения по постановкам экспериментов.

Назначение результатов:

- A. Разработка и валидация численной модели ПКРВ → реалистичный расчет распространения H_2 по гермообъему АЭС → обоснованная безопасность АЭС.
- B. Соответствие характеристик реальным рабочим параметрам ПКРВ при авариях на АЭС → единые требования к ПКРВ и контроль качества продукции (сертификация) → обеспечение требований по безопасности на АЭС.

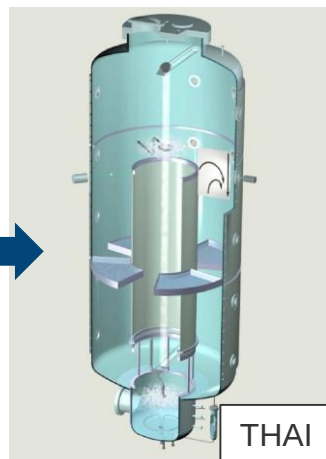
ПКРВ и установки для исследований



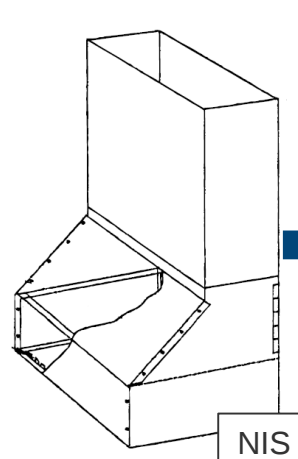
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



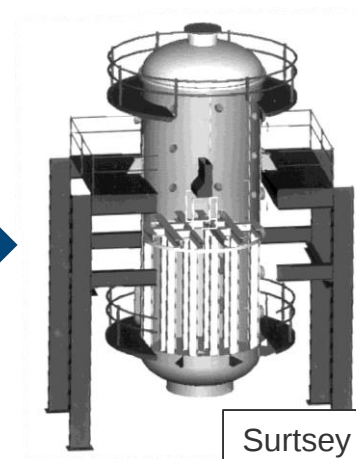
AREVA



THAI



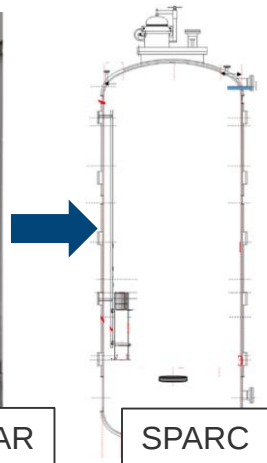
NIS



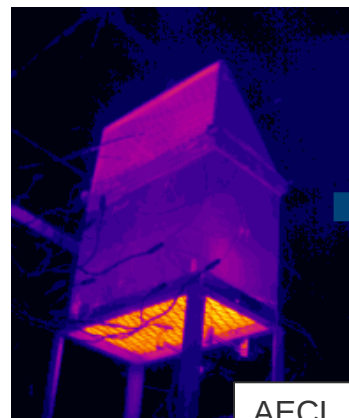
Surtsey



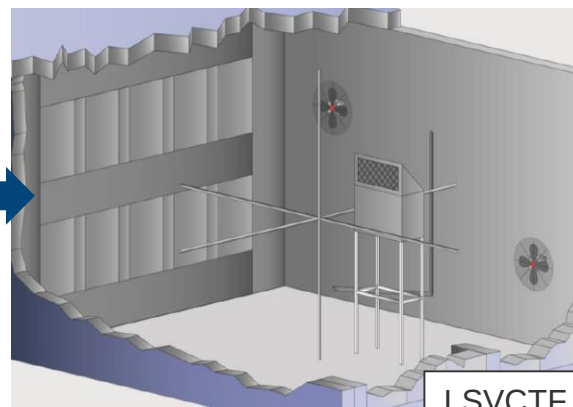
KPAR



SPARC



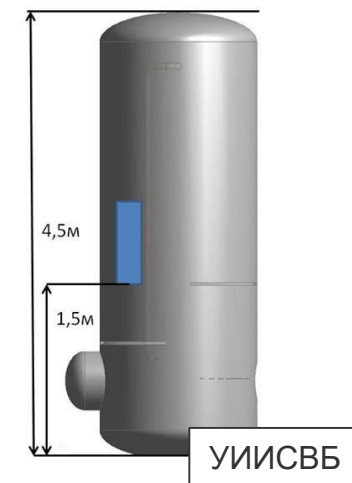
AECL



LSVCTF



PBK



УИИСВБ



Международные проекты



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

PARSOAR (1998 – 2002 гг.)

- Изучение общих принципов работы ПКРВ
- Разработка инженерных моделей работы ПКРВ

OECD/NEA THAI (2007-2009)

- Уточнение характеристик ПКРВ

OECD/NEA THAI-2 (2011-2014)

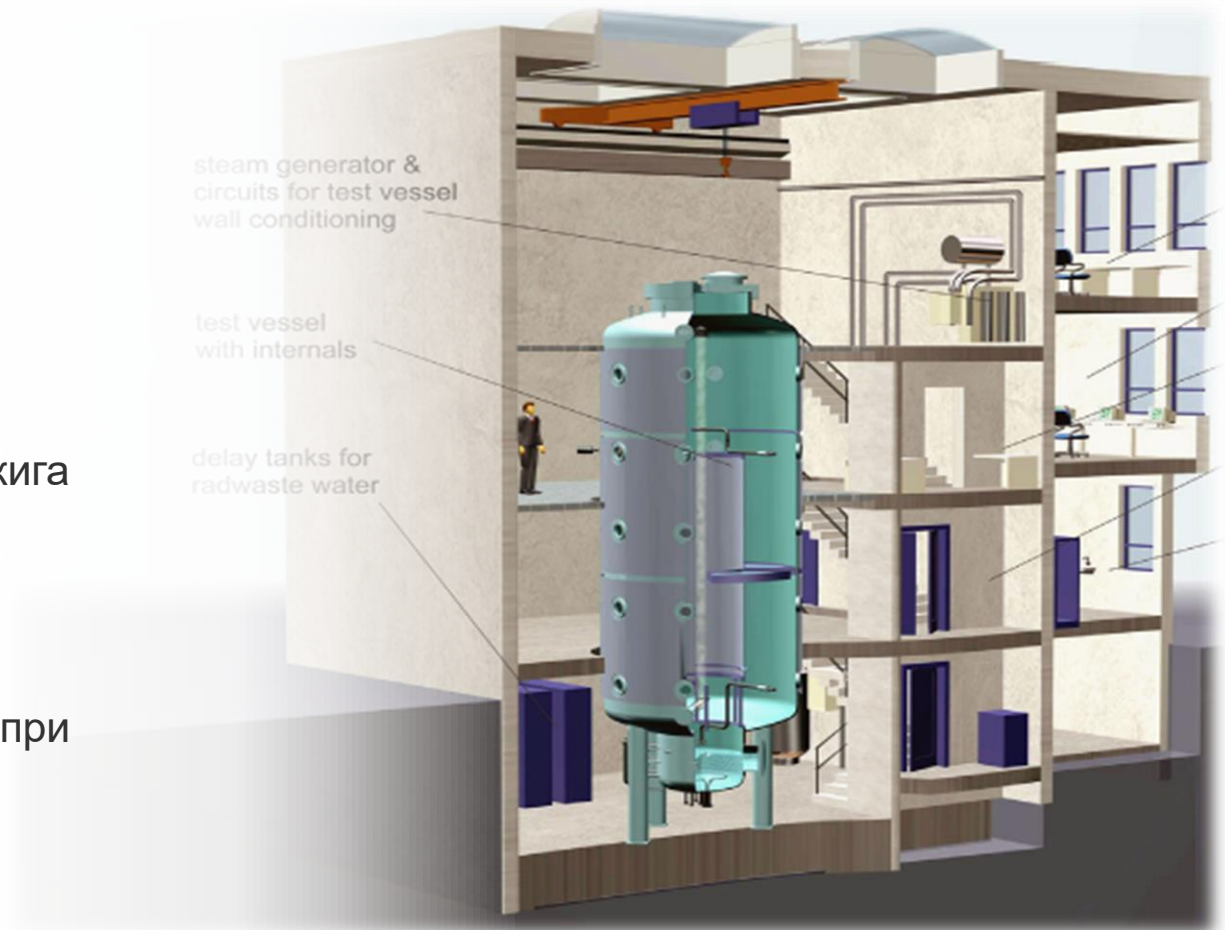
- Изучение особенностей старта и предела поджига ПКРВ
- Разработка детальных моделей работы ПКРВ

OECD/NEA THAI-3 (2016-2019)

- Исследование отклонения характеристик ПКРВ при «нестандартных» условиях среды

OECD/NEA THEMIS (с 2021 г.)

- Работы ПКРВ на поздней стадии аварии с СО



Установка THAI [2]
(лидерство по числу экспериментов и публикаций)

[2] – S. Gupta, E. Schmidt, B. von Laufenberg et al. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behavior in light water reactor containments. / Nuclear Engineering and Design, 2015.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.09.013>

Исследования ПКРВ в России



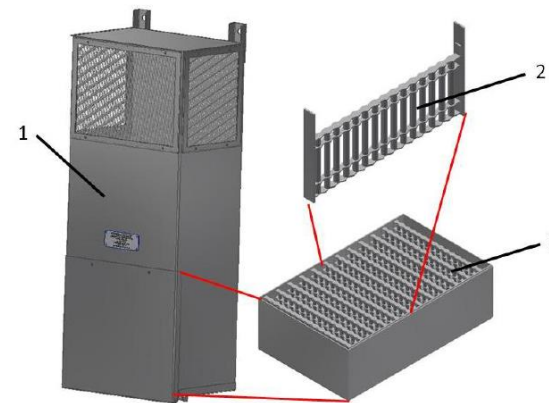
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

1. Старт = начало рекомбинации $\Delta T_{\text{катал}} = 1^\circ \text{C}$ при 0,45% H_2 [3].
2. Производительность при 0,1 и 0,15 МПа, $\approx 20\text{-}40^\circ \text{C}$ без пара и 0,2 МПа, $\approx 100\text{-}130^\circ \text{C}$ с паром в условиях квазипокоящейся смеси [4].
3. Предел беспламенной работы – 6% без пара, 11-15 % с паром [4,5].
4. Влияние борной кислоты и аэрозолей слабое [6,7].

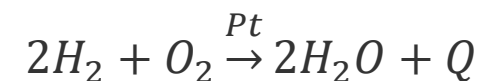
Отсутствуют данные работы ПКРВ в смеси [4]:

- с CO ,
- с обеднением по кислороду,
- с пониженной влажностью.

Пределы поджига в экспериментах напрямую не достигнуты!



Российский ПКРВ РВК-500 [8]
1 – корпус, 2 – каталитический стержень, 3 – каталитический блок



[3] – Михальчук А.В., Соловьев С.Л., Самойлов Б.С. и др. Анализ и устранение замечаний Ростехнадзора к пассивным каталитическим рекомбинаторам водорода для энергоблоков ВВЭР // В сб.: 2016 год: краткие результаты научно-технической деятельности ВНИИАЭС. – М. – 2017. – С. 17–26.

[4] – Tarasov O. V., Kiselev A.E., Filippov A.S. et al. Development and Verification of a Model of RVK-500, -1000 Recombiners for Modeling the Containment Shells of NPP with VVER by Computational Hydrodynamics // At. Energy. – 2017. – V. 121. – № 3. – P. 166–172.

[5] – Григорук Д.Г., Келлер В.Д., Христенко Е.Б. и др. Пассивный каталитический рекомбинатор водорода с двухъярусным расположением катализатора // Электрические станции. – 2013. – № 5. – С. 10–12.

[6] – Фиськов А.А., Рышкевич И.А., Варданидзе Т.Г. и Дитц А.А. Исследование характеристик рекомбинаторов водорода типа РВК 500/1000 и обоснование их работоспособности в условиях проектных и запроектных аварий // В сб.: Международная научно-практическая конференция. Перспективные технологии и материалы. Севастополь. – 2022. – С. 365–369.

[7] – Фиськов А.А., Безлепкин В.В., Семашко С.Е. и др. Влияние осаждения борной кислоты и ее солей на работоспособность пассивных систем безопасности при тяжелых авариях на АЭС // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126. – Вып. 2. – С. 81–87.

[8] – А.В. Авдеенков, В.В. Сергеев, А.В. Степанов и др. Инженерная расчетная модель каталитического рекомбинатора водорода для проведения динамических полномасштабных расчетов. / Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», 2018 г. doi:10.15518/isjaee.2018.04-06.037-056

Требования к методам и постановкам испытаний



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

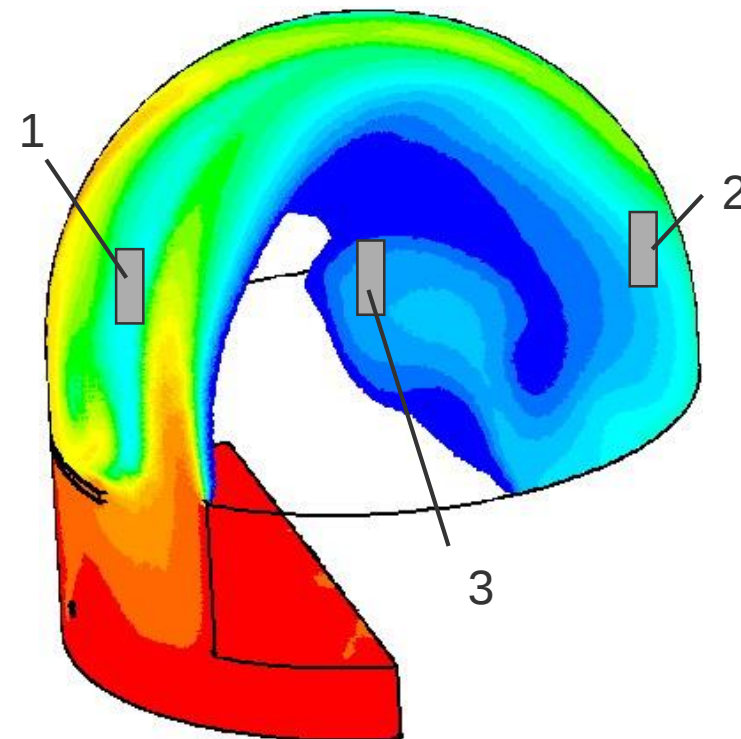
Требования [4,9-11]:

1. Обеспечение условий, характерных для тяжелых аварий.
2. Обеспечение однородности условий на входе ПКРВ.
3. Имитация больших объемов защитной оболочки АЭС.
4. Обеспечение различных сценариев взаимодействия ПКРВ с потоком – покоящаяся смесь, поток снизу, поток сверху.
5. Возможность воспроизведения результатов на других установках.
6. Определение возможности поджига каталитическими частицами.
7. Рассмотрение влияния темпов напуска водорода на работу ПКРВ.
8. Влияние гидрофобного покрытия катализатора.
9. Влияние недостатка кислорода в смеси.
10. Прямое достижение воспламенения смеси вследствие работы ПКРВ.

Требуется подтверждение характеристик ПКРВ для АЭС.

Требуются данные для валидации численных моделей ПКРВ в обоснование водородной безопасности [9-11].

Необходимо разработать методику определения характеристик работы ПКРВ для условий аварий на АЭС!



Моделирование движения газовых потоков под защитной оболочкой АЭС [12]

1. Набегающий поток смеси снизу на ПКРВ
2. Набегающий поток смеси сверху на ПКРВ
3. Покоящаяся смесь вокруг ПКРВ (базовый сценарий)

[9] – Решение заседания секции № 3 "Безопасность объектов использования атомной энергии" НТК Ростехнадзора от 28.03.2019 г.

[10] – Kirillov I., Kharitonova N., Sharafutdinov R., Krennikov N. Hydrogen safety for nuclear power plants with light water reactor units. Current state of the problem // Nucl. Radiat. Saf. J. – 2017. – V. 2. – № 84. – P. 26–37.

[11] – Харитонов Н.Л., Кириллов И.А., Симоненко В.А., Безгодов Е.В. Разработка подходов к установлению единых нормативных требований к оценке эффективности и пределов безопасного функционирования пассивных каталитических рекомбинаторов // В сб.: Забабахинские научные чтения XV. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ. – 2021. – С. 173–174.

[12] – И. В. Глазырин, А. В. Карпеев, В. А. Константинов и др. Расчеты горения водород-кислородной смеси под куполом ядерного реактора при тяжелой запроектной аварии. – Моделирование технологии ядерного топливного цикла: сборник материалов IV Научного семинара 26 – 30 января 2015 г. – Снежинск: Издательство РФЯЦ–ВНИИТФ, 2015. – 32 с.

Исследования работы РВК-500



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Основные параметры БМ-П:

- две камеры высотой 5 м и диаметром 2 м;
- рабочий объем $\approx 30 \text{ м}^3$;
- статическое давление до 0,5 МПа;
- температуры до 200 °С.

Системы:

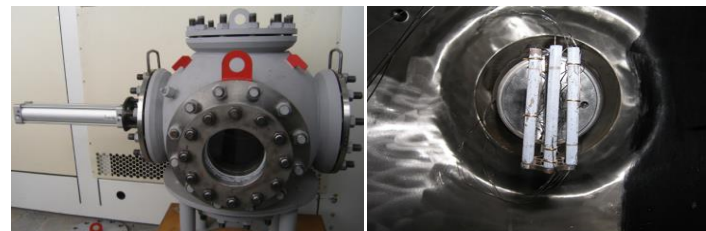
- газонаполнения;
- нагрева;
- охлаждения;
- вентилирования.



РВК-500

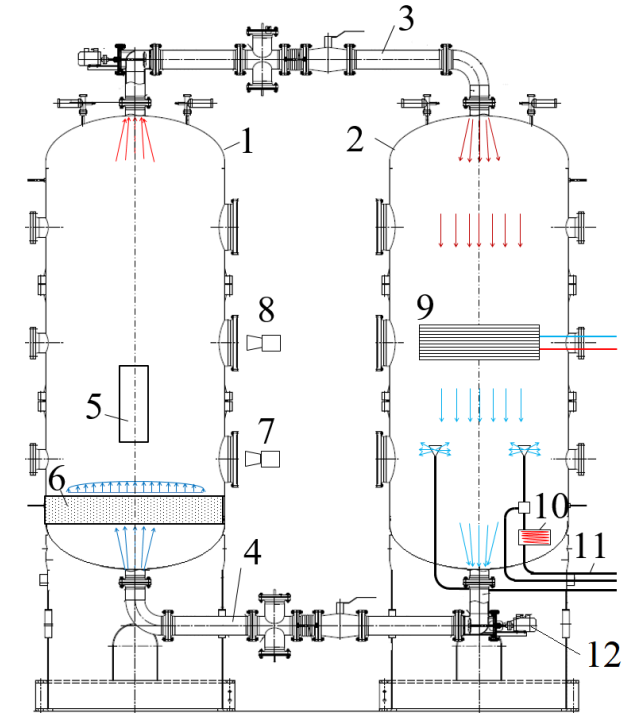
Проведено 22 эксперимента с РВК-500 согласно разработанной программе.

На КЭИП проведена оценка технологии изготовления катализатора



КЭИП

Размещение
стержней в КЭИП



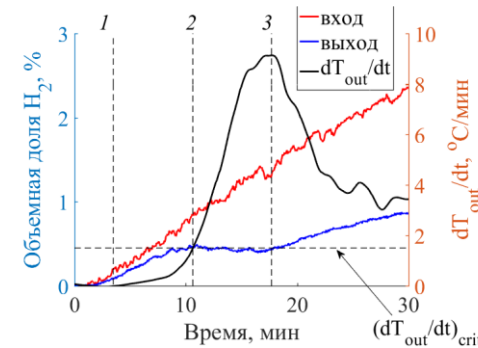
1 – БМ-П1, 2 – БМ-П2, 3 – верхний трубопровод, 4 – нижний трубопровод, 5 – ПКРВ, 6 – УРП, 7 – РИВ, 8 – штирен съемка, 9 – теплообменник, 10 – нагреватель газов, 11 – трубопроводы подачи газов, 12 – вентилятор

Кратко о результатах

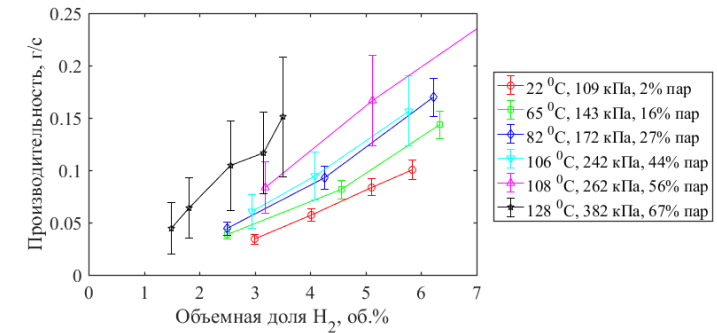


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

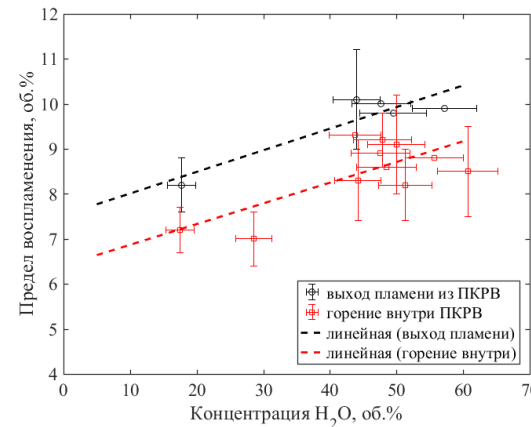
1. Получены данные по старту, производительности и пределу поджига, в том числе для условий и режимов, в которых ПКРВ ранее не испытывался.
2. Выявлены отклонения характеристик при импульсных подачах H_2 .
3. Новое! Обнаружен режим внутреннего горения без выхода пламени из ПКРВ (отличие от аналогов), получен температурный критерий возникновения горения.
4. Предложен способ проверки технологии изготовления катализатора на откол частиц.
5. Показано, что при избытке окислителя Φ ниже 1,8–2,0 происходит снижение производительности ПКРВ – дополнительная возможность по управлению аварией на АЭС в целях недопущения воспламенения смеси от ПКРВ.



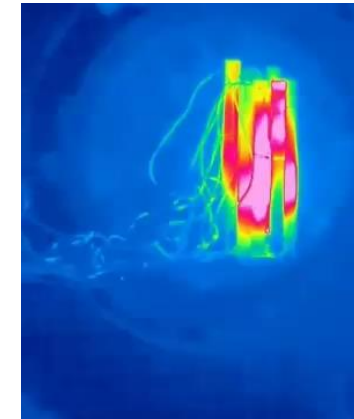
Старт ПКРВ: 1 – каталитический старт, 2- гидродинамический старт, 3 – выход на режим



Производительность ПКРВ vs объемная доля H_2 для различных условий смеси



Пределы беспламенной работы ПКРВ

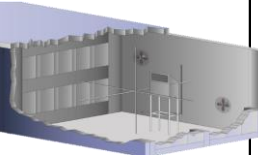


Воспламенение смеси от частицы

Итоги применения методики



- 1. ВНИИТФ – ведущая организация в РФ по экспериментальному исследованию работы рекомбинаторов H₂.
- 2. Впервые результаты получены с помощью аттестованных методик и стенда, получена положительная оценка от экспертной организации Ростехнадзора.
- 3. На полученных данных валидирована модель ПКРВ РВК-500 [14].
- 4. Малость объема БМ-П скомпенсирована двухкамерной конструкцией установки, что также позволило обеспечить однородность состава около ПКРВ, воспроизведение большего числа аварийных ситуаций, повысило точность определения производительности.

Установка					
		THAI (Германия)	SPARC (Ю. Корея)	LSVCTF (Канада)	БМ-П (РФ)
Организация		GRS	KAERI	CNL	РФЯЦ-ВНИИТФ
Высота	м	9,2	9,8	3	5
Диаметр	м	3,2	3,4	5	2
Объем	м³	60+30	82	60	15+15
Рабочее давление (максимальное)	МПа	1,4	1,5	0,3 (0,6)	0,5 (2)
Максимальная температура	°C	180	180	100	200
Плотность размещения датчиков концентрации	1/м³	0.15-0.23	0.17	0.12	0.4
Визуализация		PIV	н/д	IR	PIV, BOS, IR
Режимы испытаний		покоящаяся среда, поток сверху	покоящаяся среда	покоящаяся среда, обдув вентиляторами	покоящаяся среда, поток сверху, поток снизу
Однородность состава около ПКРВ		н/д	н/д	н/д	+
Вспомогательные стенды		н/д	н/д	CTF, HSTF	КЭИП, БМ-Л

[14] – Калякин С.Г., Кошечев А.В., Седов М.К. и др. Валидация численной модели рекомбинатора водорода РВК-500 // Теплоэнергетика, 2024. № 3. С. 5–18.

PIV – цифровая трассерная анемометрия, IR – инфракрасная камера, BOS – теневой метод, н/д – нет данных

Работы для апробации методик испытаний



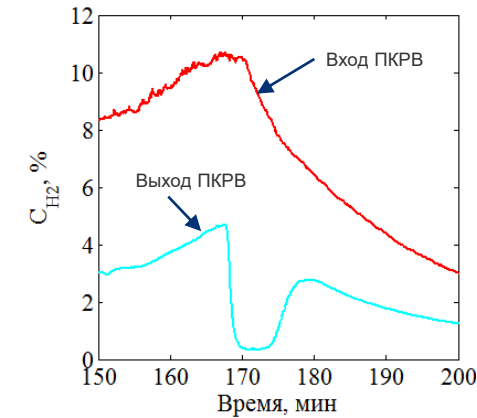
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Дополнительные испытания:

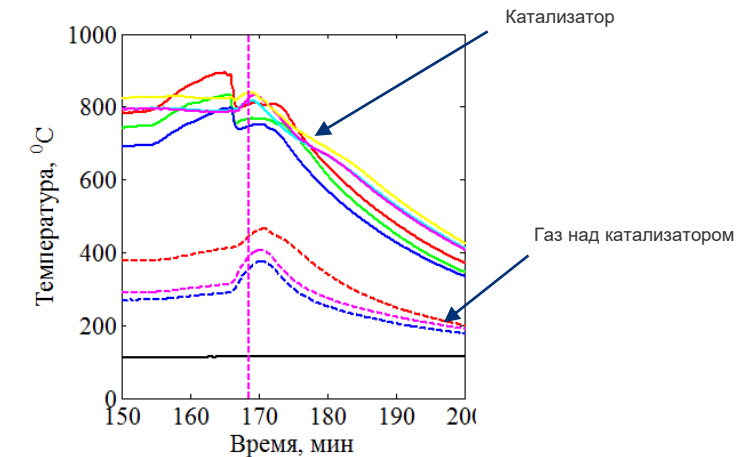
1. Оработка режима с потоком сверху;
2. Испытания ПКРВ, отличного от РВК-500, в целях подтверждения работоспособности критериев старта, производительности и поджига;
3. Испытания РВК-500 в установке, отличной от БМ-П, для подтверждения воспроизводимости результатов испытаний;
4. Испытания более производительных рекомбинаторов (например, РВК-1000) для проверки масштабируемости методов.

Задачи расчетно-теоретического обоснования:

1. Остывание каталитических стержней при возникновении внутреннего горения;
2. Запирание пламени внутри ПКРВ при внутреннем горении;
3. Распространение пламени в корпусе ПКРВ и его выход во внешнюю среду;
4. Ухудшение характеристик при $\Phi < 2$, а не при достижении стехиометрического соотношения $\Phi \leq 1$.



C_{H_2} vs время



Температура в ПКРВ vs время

Условия с обеднением смеси по кислороду

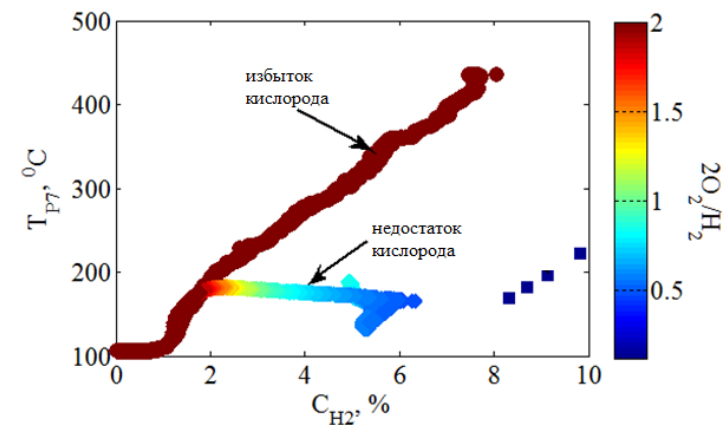
Цель – определение характеристик ПКРВ в смеси, обедненной по кислороду.

Эксперименты:

1. Обедненный по O_2 воздух, подача H_2 ($CH_2 > CO_2$), остановка подачи.
2. В N_2 добавляем H_2 . Подаем O_2 со ступенчатым расходом, компенсируем H_2 . Получаем производительность по кислороду.
3. Поиск предела поджига по кислороду.



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



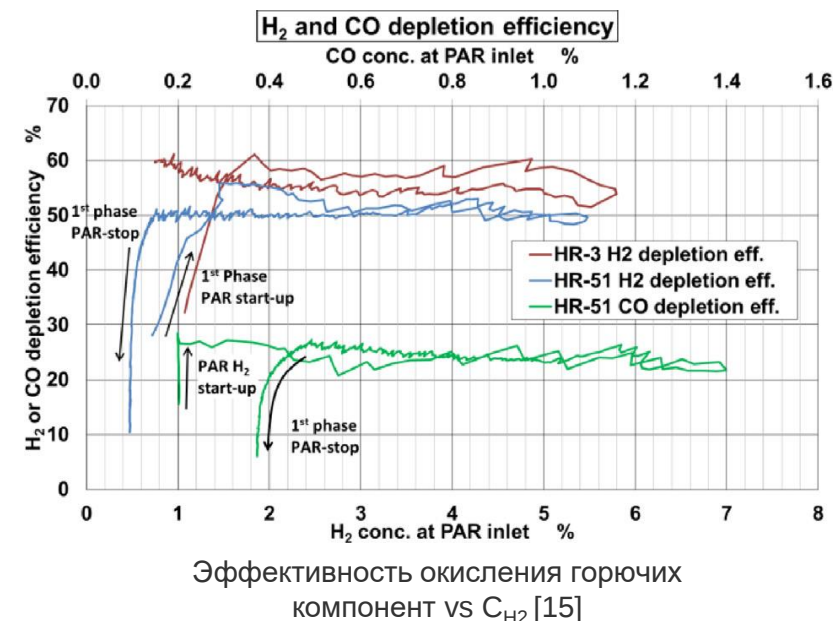
Температура газа на выходе ПКРВ vs C_{H_2}

Исследования работы ПКРВ в смеси с СО

Цель – оценка влияния СО на характеристики ПКРВ (ухудшение старта, снижение производительности).

Сравниваем с опытами без СО.

1. Подача СО, затем H_2 .
2. Совместная подача H_2 и СО (от 10:1 до 4:1).
3. Опыты 1 и 2 с обеднением по O_2 .



Полномасштабные испытания ПКРВ



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Цель – валидация численных моделей полномасштабных ПКРВ.

Возможность исследования работы рекомбинаторов с производительностью до **2 г/с**:

- РВК-1000, РВК-2, РВК-4 (до 4%);
- FR-380, FR-90/1-750, FR-90/1-1500;
- ...

3-5 экспериментов:

1. Нормальные условия, темпы подачи H_2 5,5%/ч: старт, производительность, поджиг.
2. 0,23 МПа, 100 °С, 44% пара, темпы подачи H_2 5,5%/ч: старт, производительность, поджиг
3. 0,23 МПа, 100 °С, 44% пара, темпы подачи H_2 30%/ч: старт, производительность, поджиг.
4. Другие условия...
5. Обеднение по кислороду...

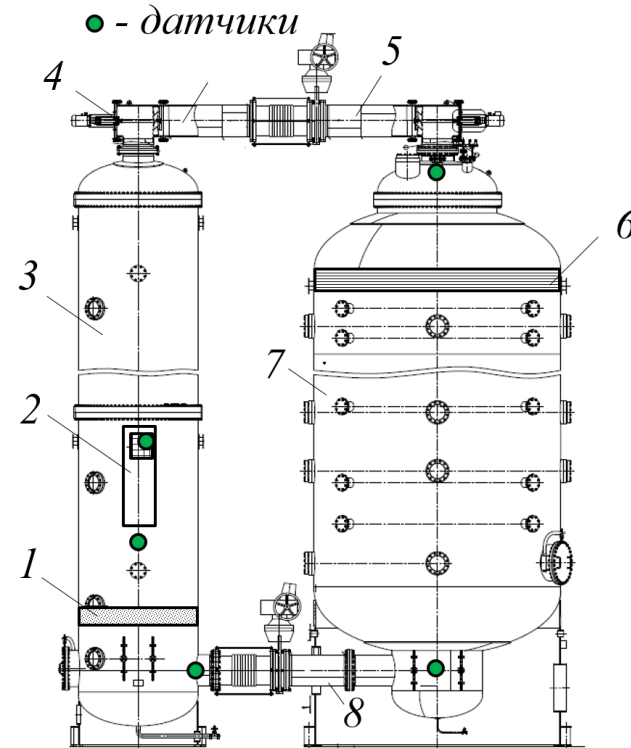


Схема опыта в БМ-У: 1 – УРП, 2 – ПКРВ, 3, 7 – испытательная и обеспечивающая камеры, 4 – вентилятор, 5, 8 – верхний и нижний трубопроводы, 6 - теплообменник



Установка БМ-У [16]

Исследования на продолжительность работы



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

1. Актуальность: длительность аварии – 72 ч, однако испытания ПКРВ ограничены 2 – 24 ч. Цель – проверка производительности при длительной работе.

Эксперимент проводится в **проточной** установке. Непрерывно подается водородо-паровоздушная смесь. Регистрируется концентрация H_2 на выходе ПКРВ.

2. Актуальность – длительное нахождение ПКРВ под ЗО до аварии без активации (запыление, адсорбция углесодержащих веществ из воздуха и др.)

Требуется проверка нескольких образцов ПКРВ с действующих АЭС на стартовые характеристики в установке типа БМ-П.

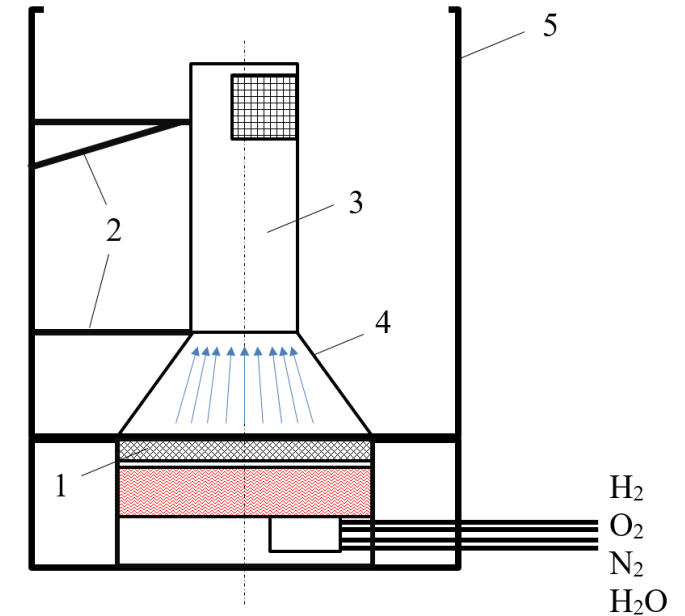


Схема проточного стенда: 1 – УРП, 2 – держатели, 3 – ПКРВ, 4 – раструб, 5 – стенки стенда

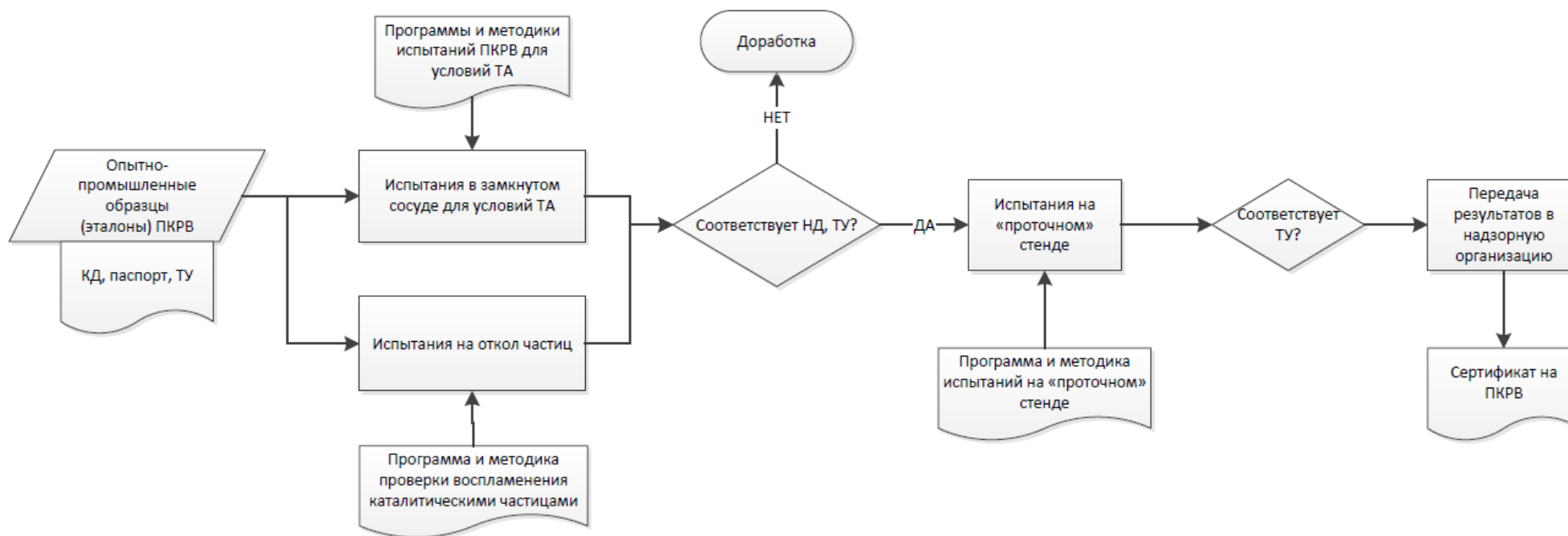
Необходимость разработки нормативного документа по рекомбинаторам водорода (1/2)



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

- Нет согласованного подхода в научном и регулирующем сообществе [17].
- Сертификация и приемка продукции практически отсутствует.

1 ЭТАП: сертификация



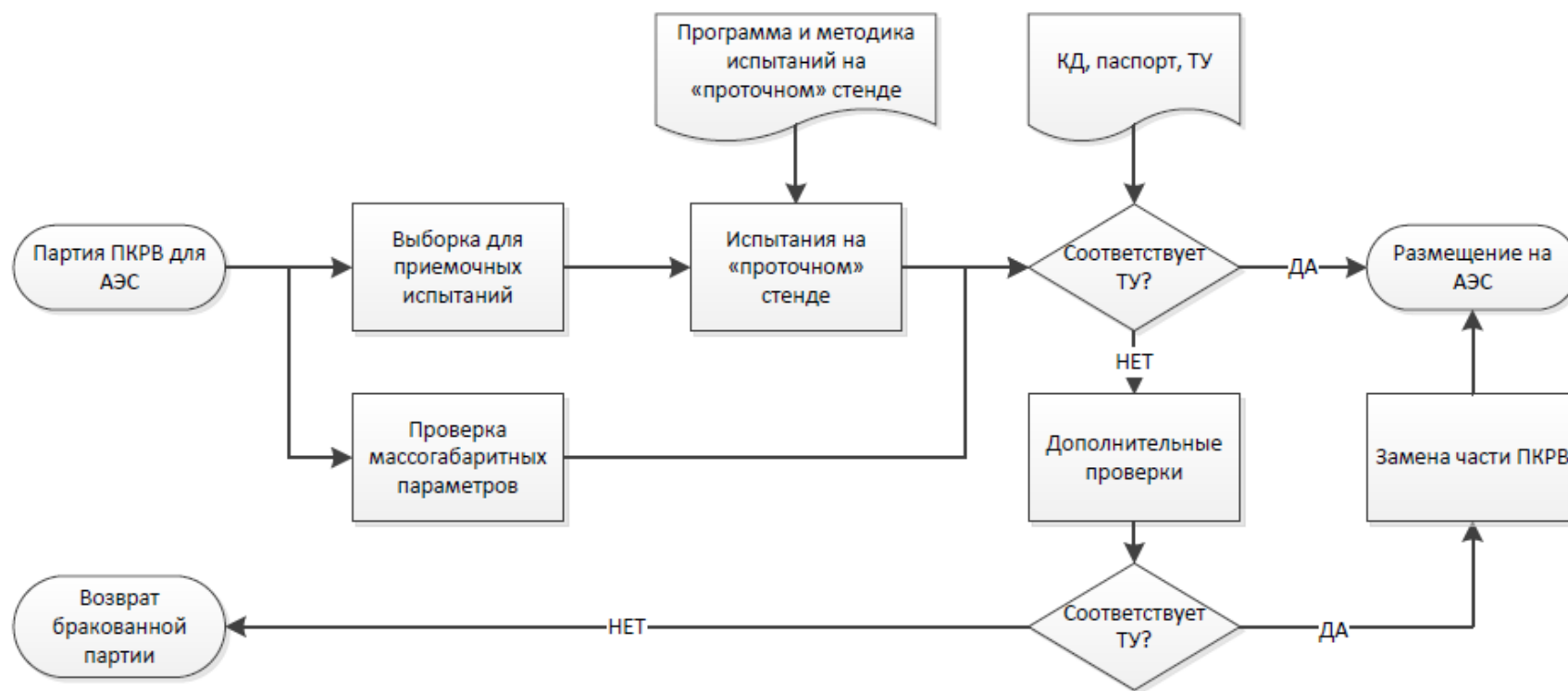
[17] – N.L. Kharitonova, I.A. Kirillov, V.A. Simonenko, E.V. Bezgodov. Harmonization of approaches to evaluation of the efficiency and safe operating limits of passive catalytic recombiners: system model. – Atomic Energy, Vol. 131, No. 4, February, 2022 DOI 10.1007/s10512-022-00868-2

Необходимость разработки нормативного документа по рекомбинаторам водорода (2/2)



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

2 ЭТАП: приемка на АЭС



Заключение



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

1. Для валидации численной модели требуются данные:
 - работа ПКРВ в условиях с обеднением по кислороду и с присутствием монооксида углерода;
 - работа полномасштабных моделей.

2. В целях нормативного контроля:
 - Доработка методики для исследований продолжительности работы ПКРВ;
 - Дополнительная проверка положений методики;
 - Разработка нормативного документа с едиными требованиями к ПКРВ, к его сертификации и приемке.



**Спасибо за
внимание!**

