Результаты и задачи исследований динамических процессов в водородосодержащих средах с целью противодействия тяжёлым авариям на АЭС с ВВЭР

Е.В. Безгодов, А.С. Иванов, В.М. Крюков,
В.А. Симоненко, О.В. Шульц, А.В. Павленко,
А.В. Ушков, Д.В. Фролов, Т.В. Чапурова
РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина

Снежинск, ЗНЧ-2019

20.03.2019

Содержание

1. Введение
2. Этапы развития тяжёлой аварии (ТА), требующие обеспечения водородной безопасности (ВБ). Условия ТА.
3. Стратификация водородосодержащих парогазовых составов (ВПГС)
4. Воспламенение
5. Горение: процессы, модели и коды
6. Проблемы создания моделей
7. Проблемы разработки кодов
8. Пути решения
9. Заключение

Введение

1. Основная часть энергии в ядерной энергетике производится на реакторах, у которых теплоносителем является лёгкая вода.
2. Самой большой опасностью для таких реакторов является осушение и сопутствующая ему деградация активной зоны (АЗ).
3. Это обусловливает развитие пароциркониевой реакции, которая приводит к выходу больших количеств водорода (около 1 т/ГВт эл.) в помещения защитной оболочки (ЗО) реакторной установки (РУ).
4. В силу больших геометрических масштабов системы и большого диапазона значений физических параметров протекающих процессов полномасштабное экспериментальное изучение их невозможно.
5. Используется расчётно-экспериментальный подход.

6. Названный подход предполагает
   1. проведение модельных экспериментов,
   2. создание широкого класса теоретических моделей, охватывающих большой перечень физико-механических и химико-физических процессов,
   3. создание на их основе программных кодов,
   4. последующее проведение ресурсоёмких расчётов на мощных вычислительных комплексах.
7. В силу сложности моделируемых систем и моделей процессов, большого диапазона длительности их протекания (от микросекунд до десятков часов) сквозное математическое моделирование их фактически невозможно.

Этапы ТА и модели

1. Поэтому создаются иерархически организованные модели. Адекватно им должны быть организованы и коды.
2. В моделях и кодах первого поколения рассматривались укрупнённо большие области (часто целые помещения), в которых среда характеризовалась однородными параметрами. В частности, при этом принимались значения концентрации водорода, усреднённые по большим объёмам.
3. В действительности во многих случаях истечение водородосодержащего состава происходит в шлейфовом режиме, что приводит к образованию стратифицированных слоёв с повышенным содержанием водорода в верхних частях помещений.
4. В случае воспламенения при таком неоднородном заполнении происходит интенсивное горение водородосодержащих парогазовых составов (ВПГС) в области с высоким содержанием водорода.
5. При достаточно высокой интенсивности горение приобретает характер взрыва, что может обусловить разгерметизацию защитной оболочки (ЗО). Это будет сопровождаться выходом накопленных в АЗ радиоактивных продуктов за пределы АЭС. Именно в этом и заключается опасность тяжёлых аварий (ТА).

Модели и эксперименты

1. Описание образования стратифицированных областей требует использования более совершенных кодов, в которых следует параллельно учитывать ряд важных процессов – различные режимы заполнения помещений ЗО парогазовыми составами, отток тепла в стенки, конденсацию паров воды, воздействие используемых средств предотвращения опасного развития процессов (спринклеров, рекомбинаторов, систем пассивного отвода тепла и др.).
2. Наиболее сложными являются процессы воспламенения, развития и распространения пламени, турбулизации возникающих течений, возможный переход горения в детонацию.
3. Для некоторых из них, в частности, для воспламенения и развития пламени с учётом различных механизмов неустойчивости, ещё нет достаточно полных теоретических моделей.
4. Для практических применений необходимо иметь коды, позволяющие описывать такие процессы.
5. Для калибровки теоретических моделей необходимо привлечение экспериментальных данных, полученных, в частности, и во ВНИИТФ.

Методология создания моделей

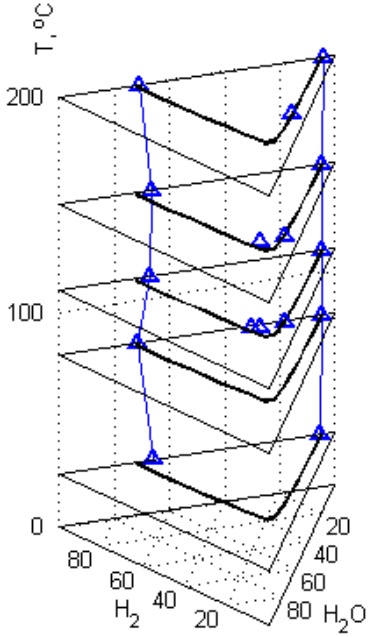
1. Методология создания моделей заключается в выделении особых областей, в частности, фронта горения, областей (зон) конденсации пара; в создании методов достаточно полного описания физико-механических и химико-физических процессов, примыкающих к таким областям.
2. Особого внимания заслуживают процессы, протекающие в областях, примыкающих к фронту горения на этапе развития неустойчивостей, а также при повышении интенсивности горения и влиянии неоднородностей заполнения, что ведёт к турбулизации среды.
3. Такие процессы ведут к взрывному протеканию горения, к переходу в режим детонационной волны.
4. Эти особенности приводят к необходимости развития и использования более сложных теоретических моделей, алгоритмов и программных комплексов.
5. Обосновывать применимость таких сложных систем математического моделирования с неизбежностью приходится с привлечением результатов соответствующих экспериментов, подобие которых с процессами, характерными для ТА, обеспечивается близостью соответствующих безразмерных параметров.

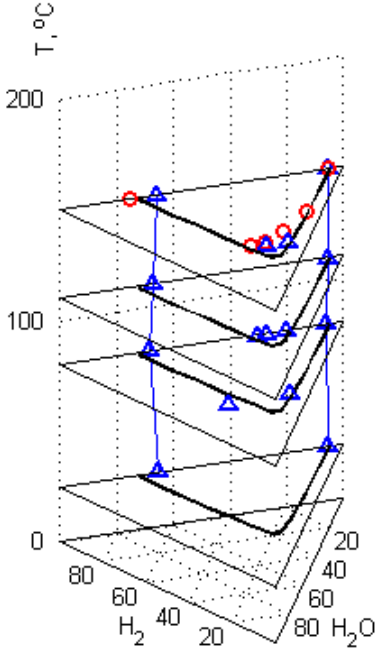
Проблемы воспламенения. Использование результатов КЭИП

1. С использованием установки КЭИП были получены данные для концентрационных пределов воспламенения ВПГС во всём диапазоне изменения давлений и температур, характерных для ТА.
2. Установлено, что поверхность концентрационных пределов лежит внутри экстраполированной поверхности, построенной на основе зависимости предложенной Шапиро и Моффетти. Выявлена немонотонная зависимость от давления и температуры, поэтому целесообразно получить более точные данные для ПКПВ, по-видимому, используя расчётно-экспериментальный подход.
3. Аналогичный подход должен быть применён для расширенной среды, включающей также монооксид углерода.
4. Такая же технология должна быть использована при получении данных для поверхности концентрационных пределов воспламенения, изучения других пожароопасных составов.

Модернизированная камера

Одна из камер установки КЭИП
(V=7,8 л.)

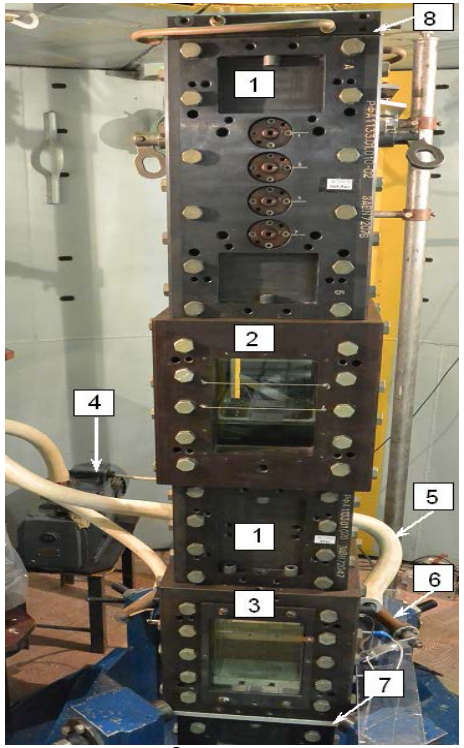




Процессы горения. Опыты на установке МУТ

1. С использованием многофункциональной ударной трубы получены прецизионные данные для эволюции горения при разных составах сухих смесей водорода и воздуха вблизи нижнего концентрационного предела.
2. На установке МУТ проведено 79 экспериментов. Для каждого типа экспериментов изучалось протекание процессов при вертикальной и горизонтальной ориентациях каналов.
3. Установка оснащена высокоточными каналами оптической регистрации и регистрации давления.

Многофункциональная ударная труба (МУТ)



1 – рабочие отсеки; 2 – измерительный отсек; 3 – измерительный отсек с инициирующими электродами; 4 – форвакуумный насос 2НВР-5ДМ; 5 – трубопровод системы вакуумирования и газонаполнения; 6 – токовый шунт; 7 и 8 – глухие стенки, ограничивающие рабочий объем МУТ; 9 – технологические отверстия, используемые для установки ионизационных датчиков

Стенд МУТ при вертикальном положении трубы.

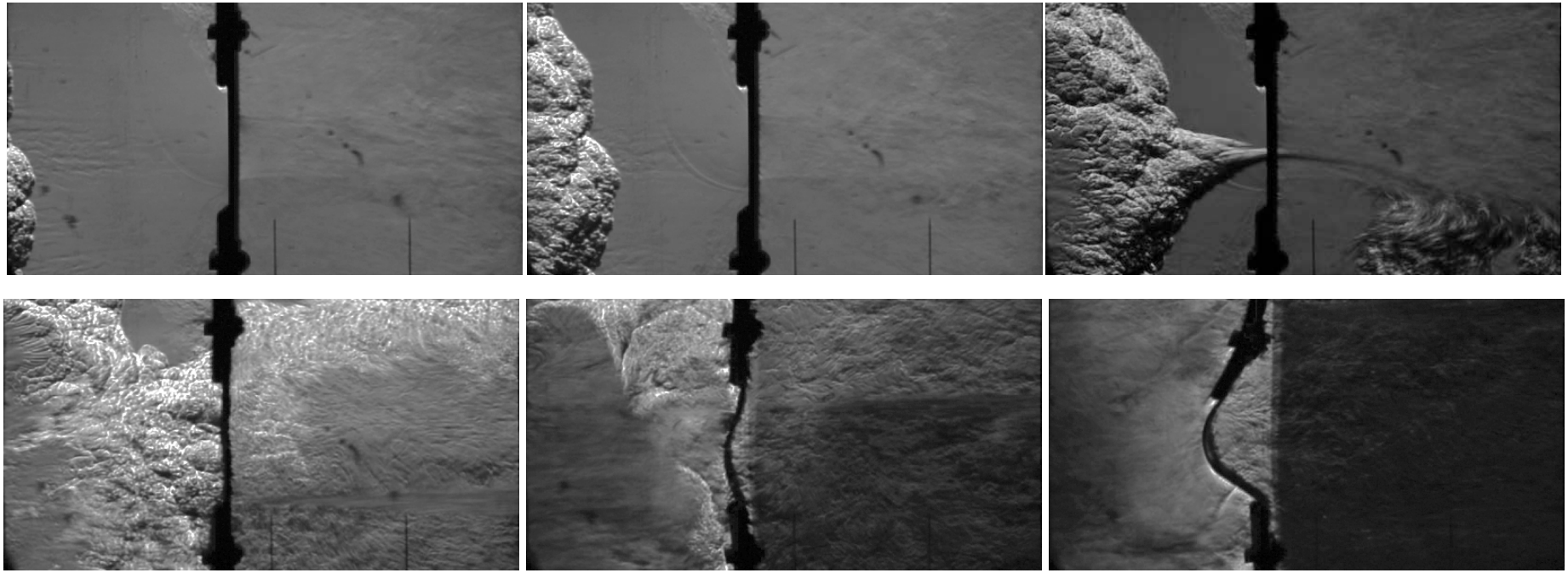
1 – блок питания мановакуумметра; 2 – вентиль отсекающий; 3 – мановакуумметр ДМ - 5002; 4 – вентили наполнения; 5 – 10 литровый баллон со смесью Г1;
6 - 10 литровый баллон со смесью Г2; 7 - баллон с водородом; 8 – воздушный компрессор СО-7Б

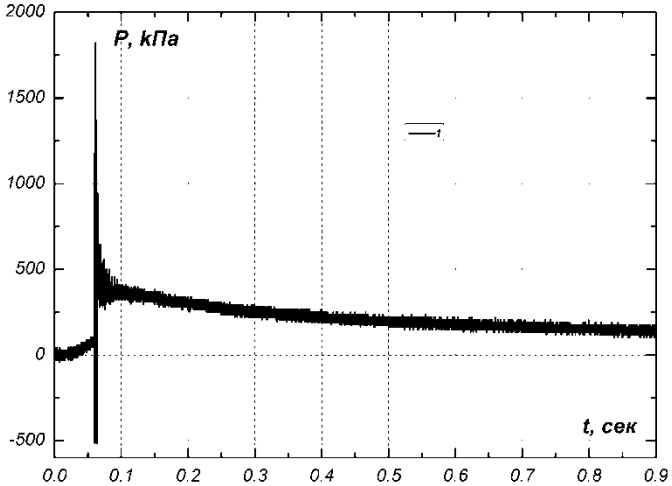
Внешний вид системы газонаполнения.

1. Распространение горения в канале без перегородок при изменений концентрации водорода вблизи нижнего концентрационного предела воспламенения (от 6 до 16 мол. %).
2. В вертикальном канале со стороны низких концентраций (от 4% до примерно 7 % водорода), при концентрациях в окрестности 7% пламя поднимается вверх в виде горящего термика с ламинарным фронтом горения. а при более высоких концентрациях – на фронте возникает и активно эволюционирует нерегулярная почкообразная структура.

1. В горизонтальном канале при малых концентрациях горящий термик поднимается к потолку (к верхней стенке канала) и блуждает вдоль неё. А при концентрациях более 10 мол. % также образуется почкообразная структура, которая, ускоряясь, удаляется от точки инициирования с опережением в верхней части структуры. При концентрациях водорода около 16 мол. % и выше такое опережение пропадает.
2. Аналогичные эксперименты проведены в канале, разделённом на два помещения перегородкой с проёмом. При низких концентрациях водорода (6 – 8 мол. %) для горизонтальной ориентации канала, перегородка может служить препятствием на пути распространения пламени. При концентрациях водорода около 10 мол. % и выше наличие перегородки существенно увеличивает турубулизацию среды в сопряжённом помещении. При переходе в него пламени скорость фронта возрастает в десятки раз.

Горизонтальный канал с перегородкой



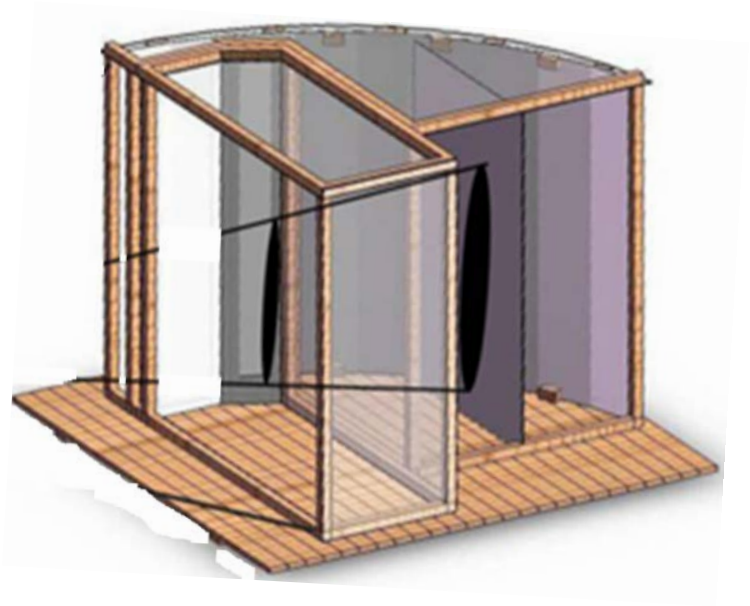


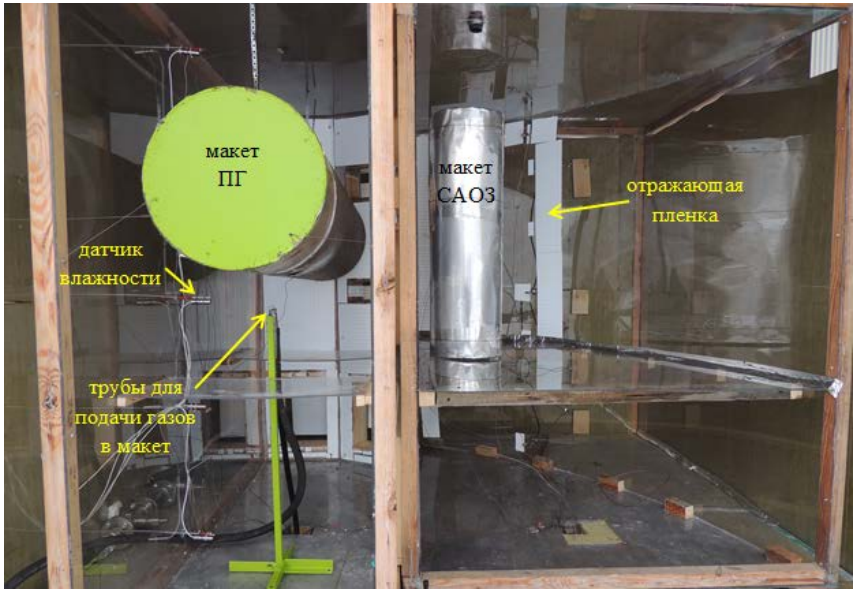
16% H_2,
12,5 мс

Установка БМ-Л

1. Из пяти серий экспериментов три были проведены в макете автономного помещения ПГ, а две – с присоединенным макетом помещения ГЦН. Во всех экспериментах поддерживалась температура макета больше 100°С, подавался водяной пар и водород в соответствии с заданными сценариями. Выбирались режимы заполнения, при которых происходит стратификация водорода. Инициирование горения производилось в области с пониженным содержанием водорода.
2. Была получена информация об изменении скорости пламени при движении первоначально в обеднённых водородом составах, а затем – при переходе в обогащённую водородом область.
3. Было также обнаружено заметное влияние макета ПГ на скорость волны горения.
4. При наличии смежного помещения было зарегистрировано существенное ускорение пламени при переходе его через проёмы в стенке, как и в экспериментах на установке МУТ.

Экспериментальная установка БМ-Л



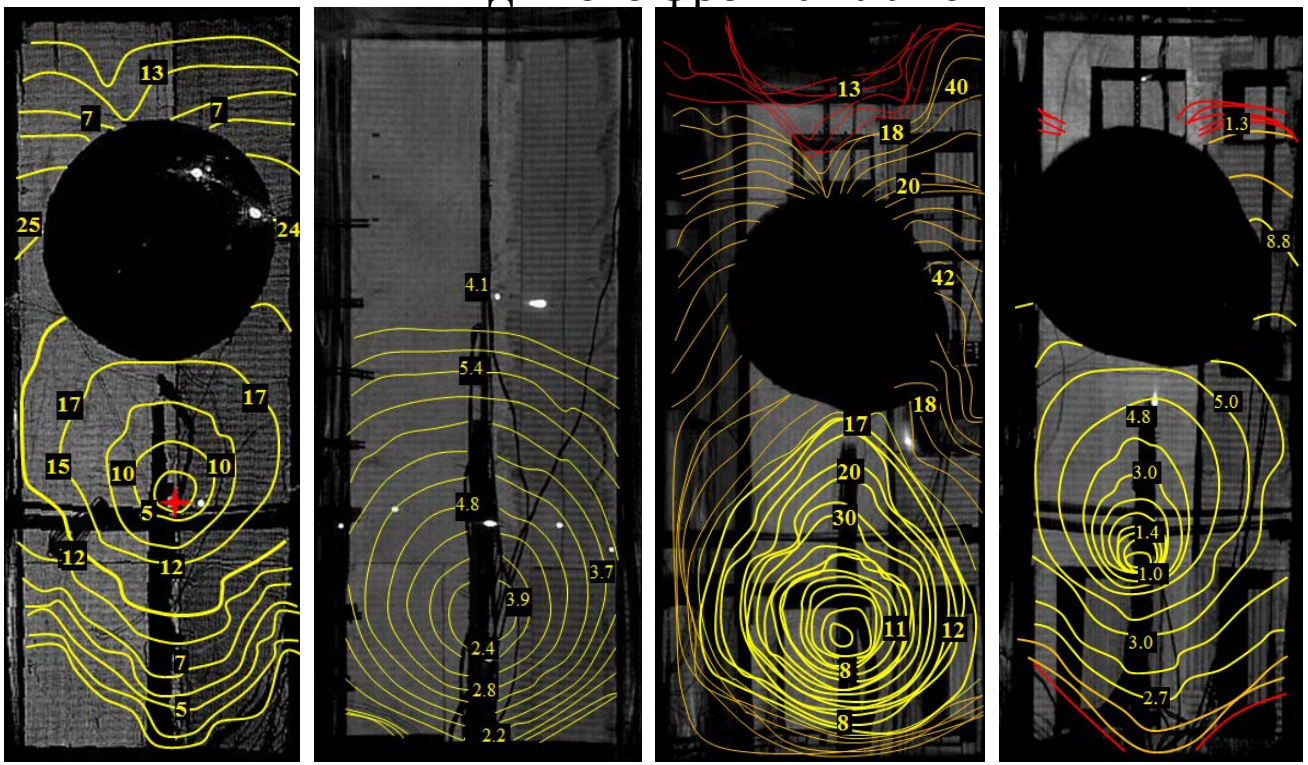


Высота 1,7 м
Объем ~ 4 м^3

Материал стенок – поликарбонат толщиной 5 мм.
В полу макета отверстия для связи с атмосферой.
Прозрачность стенок для визуального наблюдения за процессами.

Горение БМ-Л

Положение фронтов горения и значения скоростей видимого фронта пламени



а) – БМ-Л1-5(2), шаг по времени 7,1 мс

б) – БМ-Л3-2(2), шаг по времени 10 мс

в) – БМ-Л5-2(2), шаг по времени 1,5 мс

г) – БМ-Л5-3(2), шаг по времени 19,2 мс

Параметры искры:

- энергия искры 50 мДж;
- искровой промежуток ≈1,0 мм;
- длительность искры 1,5 мс

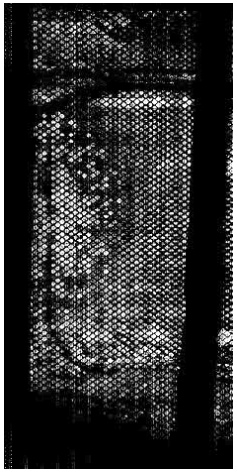
Установка БМ-П

1. Установка предназначена экспериментов и испытаний оборудования при температурах до 200 ºС и статических давлениях до 0,5 МПа, характерных для ТА, и динамических давлений до 2 МПа в зависимости от характера нагружений.
2. Она оборудована системами нагрева и термостабилизации, подачи газовых сред различных составов, методиками для измерения статического и динамического давлений, температуры и влажности, отбора газовых проб, скоростной видеорегистрации, измерения скорости фронта пламени.
3. Установка состоит из двух камер. Их можно использовать автономно или совместно. В этом случае они соединяются цилиндрическим каналом с внутренним диаметром 50 см, который устанавливается на трёх высотах.
4. Каждая камера состоит из цилиндрической части высотой 4 м и двух эллиптических днищ. Днища приварены к примыкающим к ним секциям цилиндра. На трёх уровнях цилиндрической части камеры и на торцах верхней и нижней крышек расположены иллюминаторы.
5. Они используются либо для оптических измерений, либо для установки герморазъемов с кабелями используемых методик.

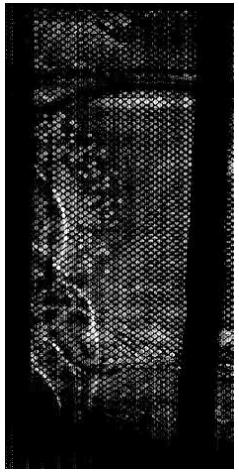
Установка БМ-П

Параметры одной камеры: высота 5 м, диаметр 2 м, объем ~14,5 м^3

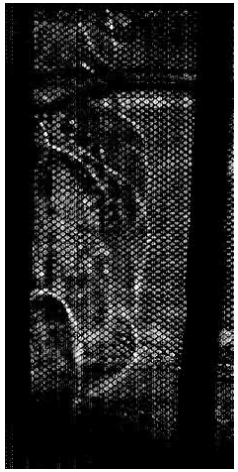
БМ-П2-3 Распространение пламени



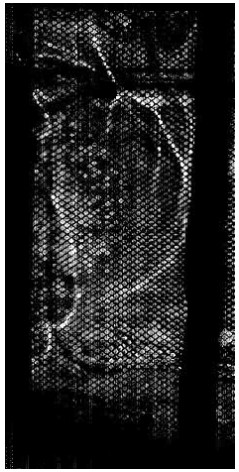
а) – 9,2 мс



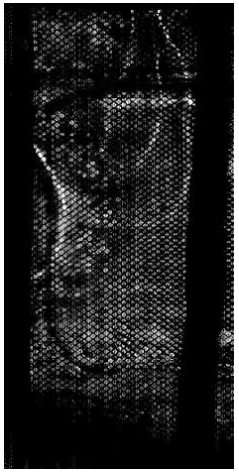
б) – 18,4 мс



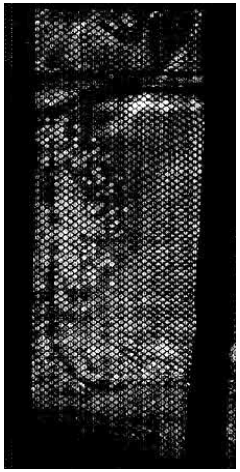
в) – 27,6 мс



г) – 36,8 мс



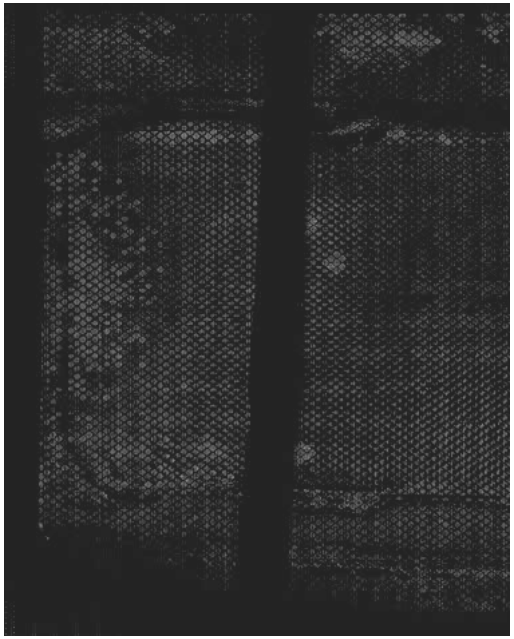
д) – 46,0 мс



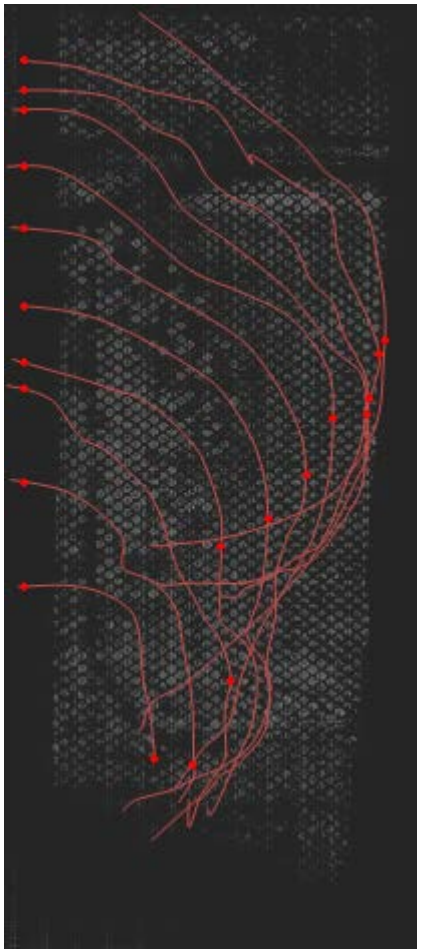
е) – 55,2 мс

Горизонтальная скорость распространения пламени
U=1,7-1,9 м/с

Вертикальная скорость распространения пламени
U=4,3-4,8 м/с



8116 fps



Некоторые результаты БМ-П

1. На установке БМ-П было проведено 5 серий экспериментов в постановке, аналогичной БМ-Л. Изучались процессы заполнения и стратификации газов в объемах моделей помещений ЗО, воспламенения ВПГС в выбранных точках стратифицированных слоёв, развития фронта пламени и распространения горения.
2. Наиболее яркими результатами являются: всплытие крупных термиков, воспламенение в верху и возврат вниз волны горения. Горение в связанных камерах.
3. Было проведено 3 дополнительных эксперимента.
4. Во всех экспериментах получены представительные экспериментальные данные. Они могут быть использованы как для развития теоретических моделей указанных процессов, так и для совершенствования существующих и перспективных проектных кодов и кодов нового поколения.
5. Сформулированы предложения о продолжении этих работ.

Модели и коды

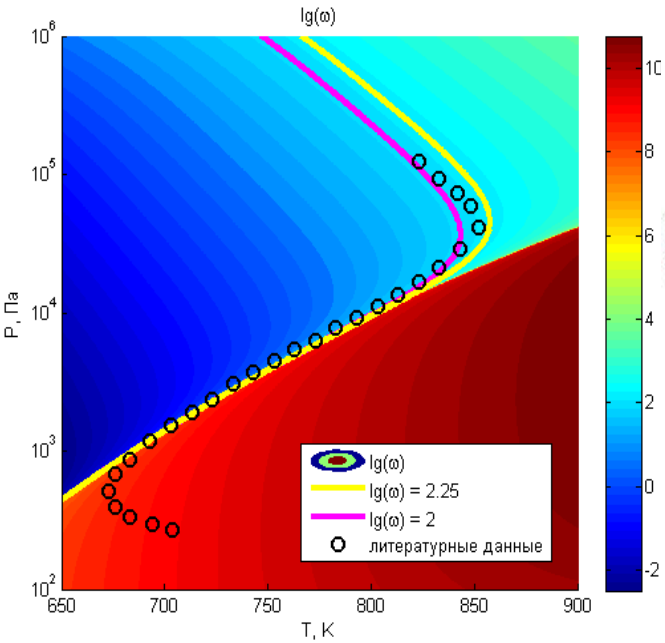


Рис. 1 – Скорость адиабатического саморазогрева: модель и литературные данные

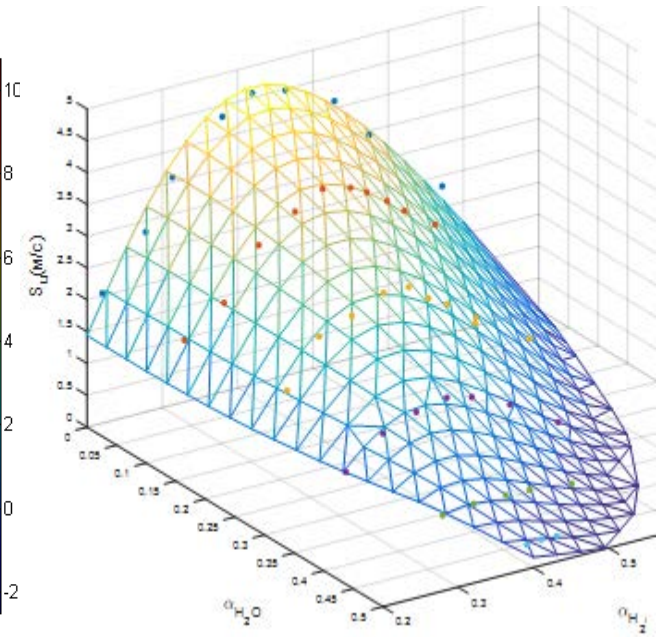


Рис. 2 – Расчетная скорость ламинарного пламени (поверхность) и экспериментальные данные (точки)

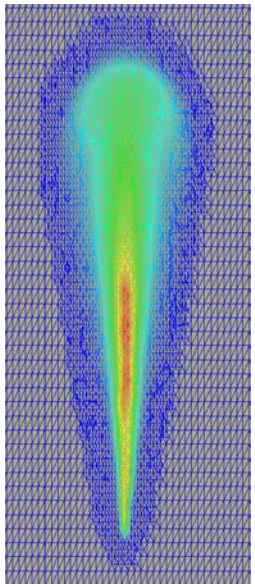


Рис. 3 – Горение струи водорода в воздухе (адаптивная сетка)

Рис. 4 – Моделирование работы рекомбинатора в БМ-П

Создание и развитие моделей:

- Воспламенения и самовоспламенения (рис. 1);
- Горения и распространения пламени (рис. 2, 3);
- Работы катализатора/рекомбинатора (рис. 4).

Создание и развитие кодов:

- Создание универсального кода **ЯРУС** для моделирования разновременных и разномасштабных процессов, сочетающего преимущества CFD-кода и кода с сосредоточенными параметрами (**нет аналогов**). Основа: открытый код OpenFoam.

Расчётно-теоретическое обеспечение

Точки – эксперимент, линии - расчет

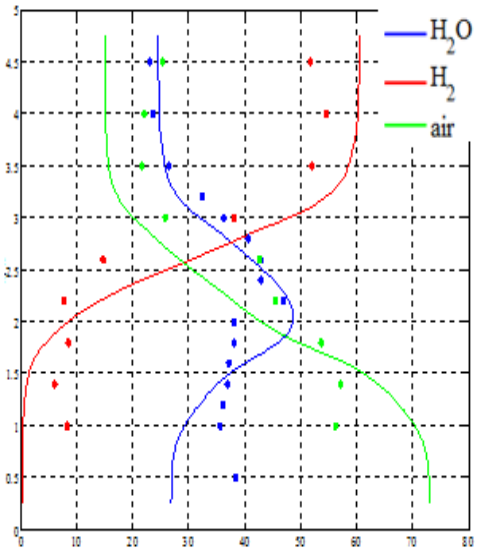


Рис. 1 – Сравнение данных по распределению состава в установке БМ-П и результатов расчета

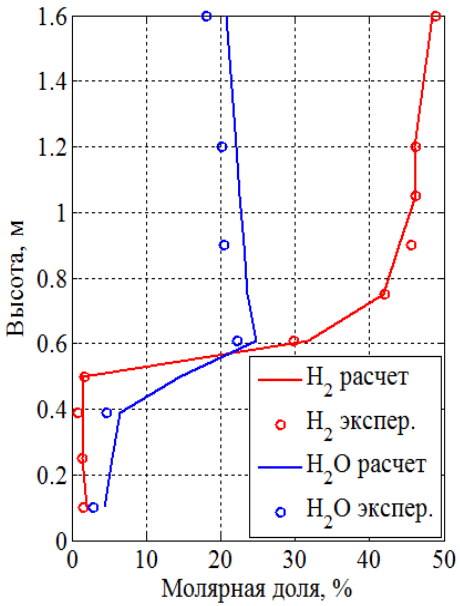


Рис. 2 – Сравнение экспер. и расчетных данных по составу газов с учтенными дефектами установки БМ-Л

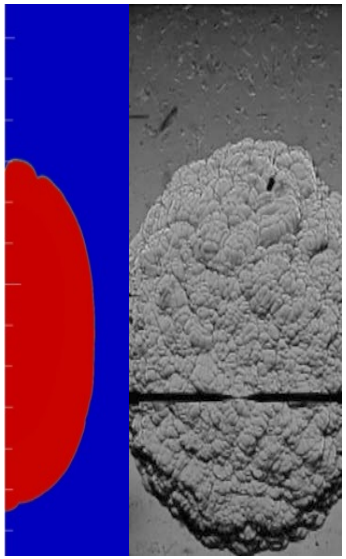


Рис. 3 – Горение 16 % водорода в воздухе (МУТ)

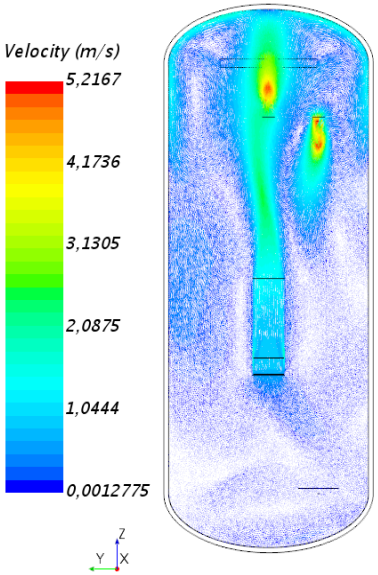


Рис. 4 – Поля скоростей смеси при работе вентиляторов и рекомбинатора водорода в БМ-П

Применение и развитие расчетных инструментов:

- верификация и валидация CFD-методик (рис.1-3);
- обоснование и оптимизация экспериментальных программ и методик испытаний (рис. 4);
- прогнозирование результатов экспериментов, уточнение постановок испытаний (рис. 2, 4).

Используемые коды:

1. Star-CCM+
2. Cantera
3. OpenFOAM
4. ПК «ФОКУС»

Развитие экспериментальной базы

1. 2019-2021гг.
   1. Дооснащение существующих установок и повышение возможностей и точностей методик измерений
   2. Проведение исследований в интересах испытания рекомбинаторов
2. 2021-24 гг
   1. 1.Создание новой установки (М=1:10)
   2. Расширение программ испытаний (полный макет, спринклеры, рекомбинаторы в динамике)

Заключение

1. Учитывая сложность процессов, протекающих на водородной стадии развития ТА, целесообразно вести параллельное развитие кодов, на основе упрощённых моделей с сосредоточенными параметрами (АНГАР, Купол-М, Кортекс) и CFD – кодов, основанных на «первопринципных» моделях описания протекающих процессов.
2. Экспериментальные данные, полученные на установке КЭИП, и накопленные в работах других исследователей позволяют создать приемлемую для реализации в современных кодах модель воспламенения водородосодержащих парогазовых составах.
3. Представляет интерес расширение модели воспламенения, учитывающее добавление в ВПГС как новых горючих компонентов (например, CO и др.), так и флегматизаторов (например, CO_2). При этом начальная стадия развития пламени является существенной составляющей расширенной модели горения.
4. Заслуживает отдельного внимания выяснение рельефности поверхности воспламенения ВПГС. Поэтому созданную теоретическую модель и код целесообразно использовать для проверки этого результата и, в случае подтверждения его, - для построения всей поверхности концентрационных пределов воспламенения.

5. Ценная экспериментальная информацию для построения и верификации моделей описания горения с ламирным пламенем и развития ламинарного фронта пламени при появлении различных неустойчивостей была получена в экспериментах на установке МУТ. Эти данные следует использовать для развития CFD-кодов.

6. Определённые трудности возникнут при описании развитых ячеистых (пузырьковых) структур в силу стохастичности их возникновения и эволюции. Предстоит создать технологии описания таких структур и создания соответствующих кодов.

7. Особую ценность представляют эксперименты с постановкой в канале установки МУТ перегородки с проёмом. В них наблюдается интенсивная турбулизация газового потока при прохождении проёма. В результате за проёмом стремительно возрастает скорость пламени, и горение приобретает объёмный характер.

8. В экспериментах на больших макетах – установка БМ-П (прочный) и БМ-Л (непрочный) – были получены данные о стратификации ВПГС при заполнении.
9. Полнота и глубина теоретических моделей гораздо лучше достигается, если их развитие будет сопровождаться специализированной программой экспериментальных работ.
10. Представляет заслуженный интерес создание новой прочной установки БМ-ПУ увеличенного размера (диаметром Хм. и высотой Ум.). При формировании в БМ-ПУ структуры помещений подобной ЗО будет обеспечены более адекватная постановка и проведение уникальных экспериментов для верификации моделей и кодов с учетом масштабирования расчетов до размеров ЗО АЭС.

Спасибо за внимание