

Расчетные исследования теплового состояния испытательных стендов БМ-П и БМ-ЛР

А.А. Рякин, Е.С. Горбачева, О.В. Койнов,
М.В. Никульшин, О.С. Путилин

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

«XIV Забабахинские научные чтения»

18-22 марта 2019 г., г. Снежинск



РФЯЦ-ВНИИТФ

Предприятие Госкорпорации «Росатом»

РЕКОМБИНАТОРЫ: ЧТО ЭТО?

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ проводятся исследования рекомбинатора водорода на основе высокопористых ячеистых материалов. Рекомбинатор служит для беспламенного сжигания водорода. Необходимость беспламенного сжигания водорода заключается в том, что при авариях на АЭС в защитную оболочку выбрасывается значительное количество водорода. Смешивание водорода с воздухом может приводить к образованию взрывоопасной смеси, горение и детонация которой представляет угрозу целостности защитной оболочки. Для исключения возможности детонации этой смеси на АЭС с ВВЭР используют метод беспламенного сжигания водорода в пассивных автокаталитических рекомбинаторах.

Рекомбинатор—устройство для удаления водорода из газовой смеси, состоящее из корпуса и блока катализаторов. Катализаторы-вещества, которые изменяют скорость реакции, а сами к концу процесса остаются неизменными как по составу, так и по массе. На поверхности катализаторов непосредственно осуществляется реакция окисления водорода.

В рекомбинаторе при протекании воздуха через пористый катализатор происходят различные физико-химические процессы, основными из которых являются экзотермическая химическая реакция окисления водорода на каталитических поверхностях рекомбинатора и конвективное течение газовой смеси через каталитический блок.

РЕКОМБИНАТОРЫ: ЗАЧЕМ ОНИ НУЖНЫ?

Основными рабочими характеристиками рекомбинаторов являются:

- производительность (масса водорода, удаляемая рекомбинатором за единицу времени);
- стартовая концентрация водорода (концентрация водорода, при которой начинается работа рекомбинатора);
- финишная концентрация водорода (концентрация водорода, при которой прекращается работа рекомбинатора);
- время выхода на номинальную производительность.

Наиболее важной технической характеристикой рекомбинатора является производительность, измеряемая при заданном составе входящего газа. Состав входящего газа зависит от концентрации водорода, значения температуры газовой среды и показателей влажности, а также от концентрации и температуры смеси на выходе из рекомбинатора.

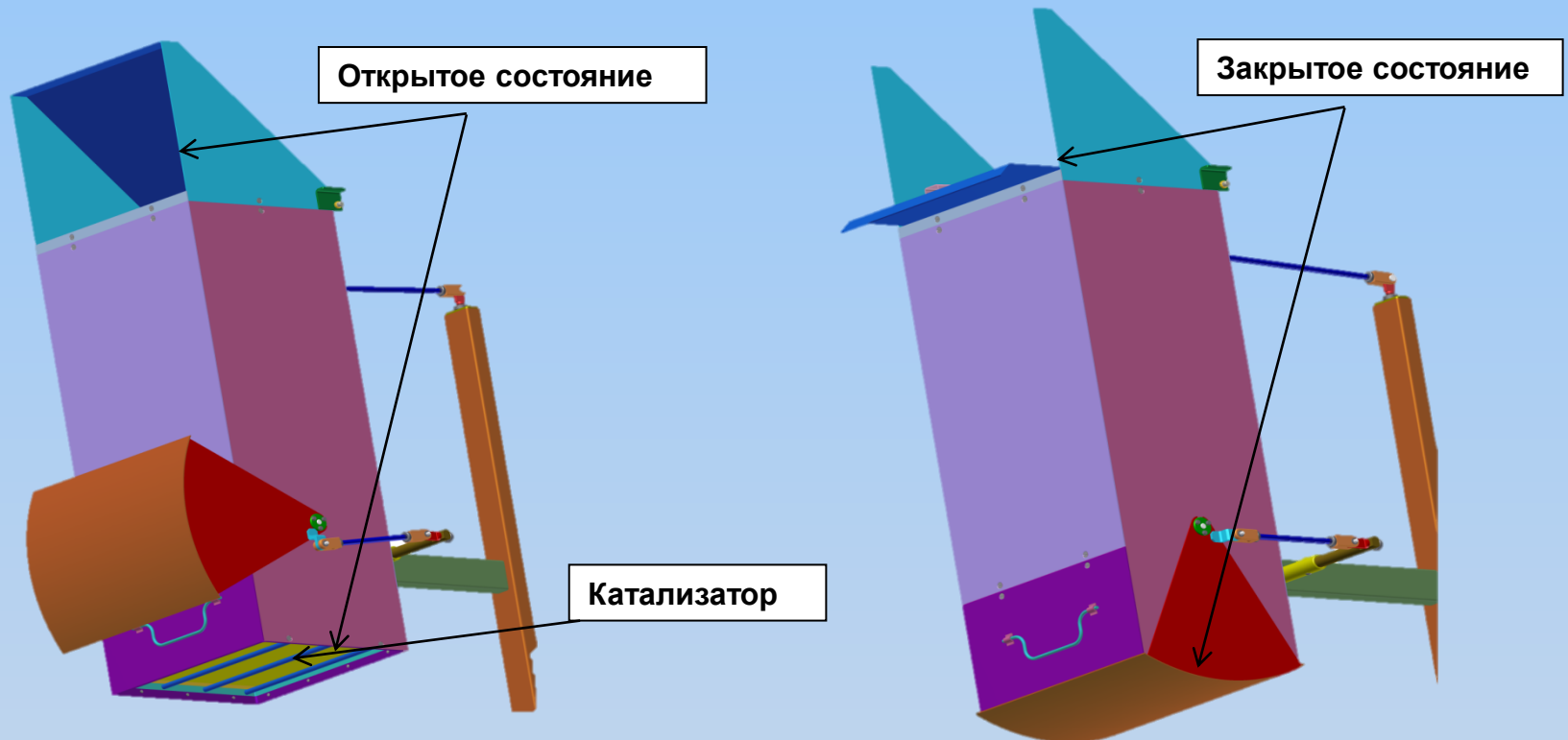
Задачи экспериментальных исследований, проводимых в РФЯЦ-ВНИИТФ:

- получение данных о характеристиках рекомбинатора в различных условиях;
- получение данных о характеристиках рекомбинатора в режиме постепенного повышения концентрации водорода и водяного пара;
- получение данных по определению диапазона беспламенной работы рекомбинатора при атмосферном давлении.

РЕКОМБИНАТОР: КОНСТРУКЦИЯ

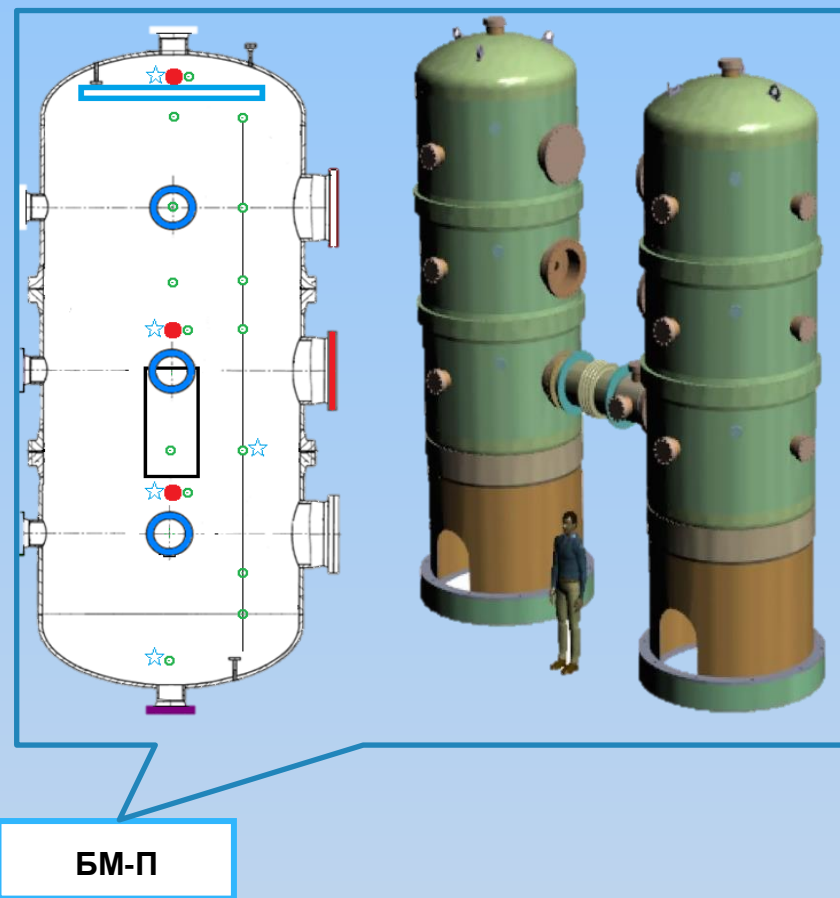
Корпус служит контейнером для хранения пластин катализаторов и их защитой от внешних воздействий. Корпус рекомбинатора имеет вид трубы квадратного сечения, выполненной из нержавеющей стали с толщиной листа 1 мм.

Рекомбинатор оснащен колпаком и устройством открытия и закрытия входов рекомбинатора, для исключения самопроизвольного начала работы рекомбинатора. Колпак представляет собой треугольную призму с одним выходным отверстием. Размеры колпака составляют 394×316×300 мм.



ИСПЫТАНИЯ РЕКОМБИНАТОРОВ ВО ВНИИТФ

Для проведения испытаний по определению диапазона концентраций водорода, в котором осуществляется режим беспламенной работы рекомбинатора при атмосферном давлении, повышенных температурах и влажностях, характерных для сценария тяжелых аварий на АЭС, используются камеры БМ-ЛР и БМ-П.



ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАМЕР БМ-П И БМ-ЛР

Предварительные расчеты необходимы для прогнозирования процессов, вероятных при проведении экспериментов, оценки температурных режимов и обеспечивающих необходимые условия для тестирования рекомбинатора.

Цели расчетов камеры БМ-П: расчетное обоснование достаточности системы охлаждения для поддержания постоянной температуры газовой смеси внутри камеры.

Цели расчетов камеры БМ-ЛР: определение времени, за которое температура поликарбонатного листа превысит температуру плавления поликарбоната 150°C.

Задачи расчетов камеры БМ-П и БМ-ЛР:

- Моделирование работы блока катализаторов;
- Определение максимальных температур в камерах при работе рекомбинатора;
- Расчет полей скоростей газовой смеси, движущейся в установке при работе рекомбинатора;

При концентрации водорода 3% энерговыделение катализатора составляет 9,6 кВт. Для концентрации водорода до 8% повышает энерговыделение до 24кВт.

КАМЕРА БМ-П: КОНСТРУКЦИЯ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

Камера БМ-П представляет собой цилиндрическую камеру высотой 5 м и диаметром 2 м.

Камера БМ-П снабжена системой термостабилизации и системой охлаждения (радиатор, теплоноситель воздух с температурой окружающей среды).

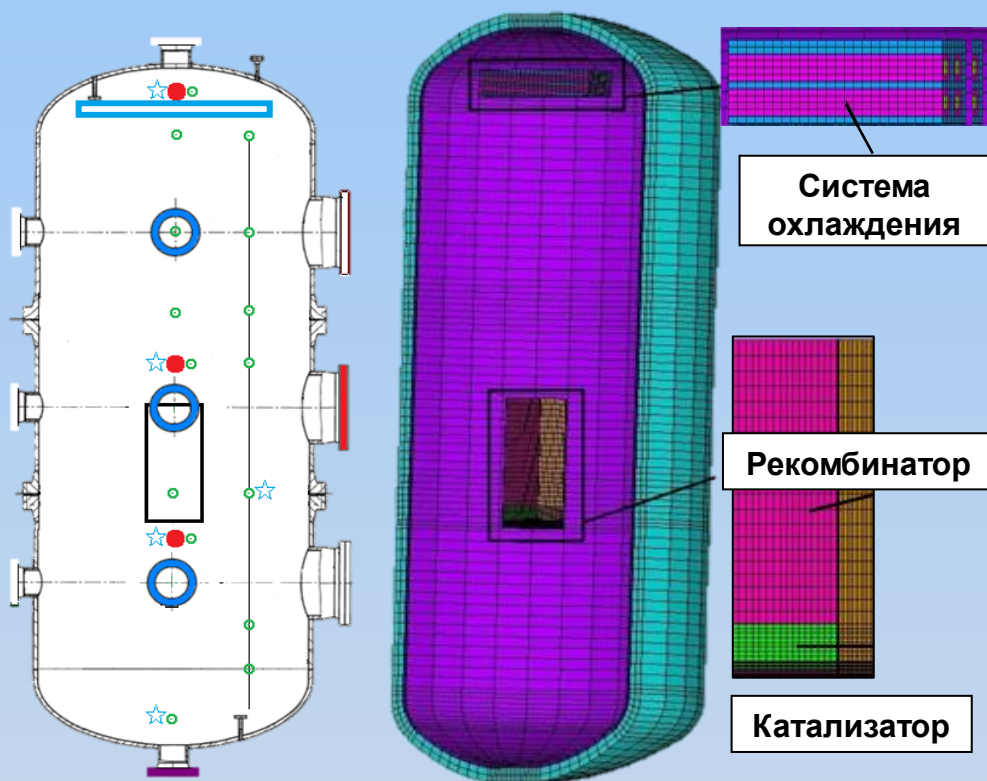
№	Давление, кПа	Температура, °С	Время, с
1	103	20	462.5
2	150	70	575
3	250	110	862.5
4	500	110	1712.5

Расчеты проводились для четырех вариантов начальных условий, с включенной и выключенной системой охлаждения.

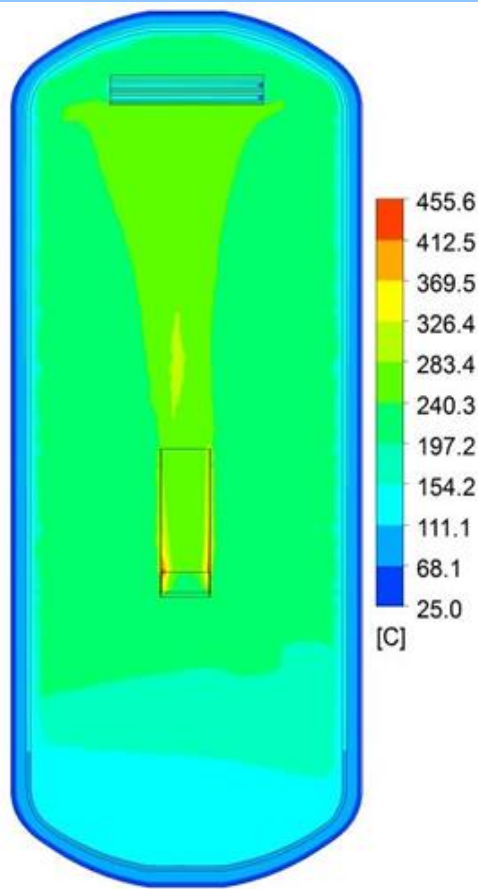
Температура теплоносителя в системе охлаждения принималась равной 20°С.

Газовая смесь моделировалась при помощи типа элемента соответствующего газу/жидкости, катализатор моделировался типом элемента пористое тело.

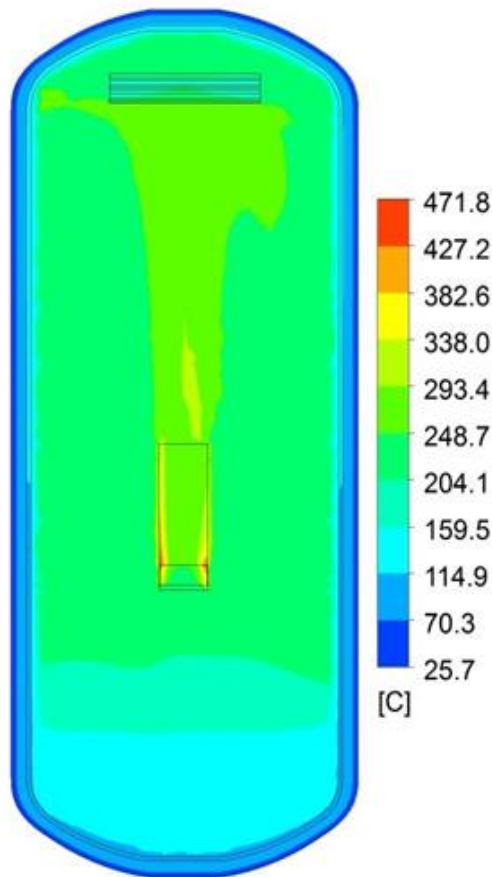
В расчетах использовалась модель турбулентности $k - \varepsilon$ и учитывалась гравитация.



РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КАМЕРЫ БМ-П



Температурное поле станда
при работе рекомбинатора с
включенной системой
охлаждения



Температурное поле станда
при работе рекомбинатора с
выключенной системой
охлаждения

Температурные поля
камеры БМ-П при давлении
 $P=500$ кПа и $T=110^{\circ}\text{C}$ на
момент времени 1710
секунд. Максимальная
температура с включенной
системой охлаждения
составляет 455.6°C .

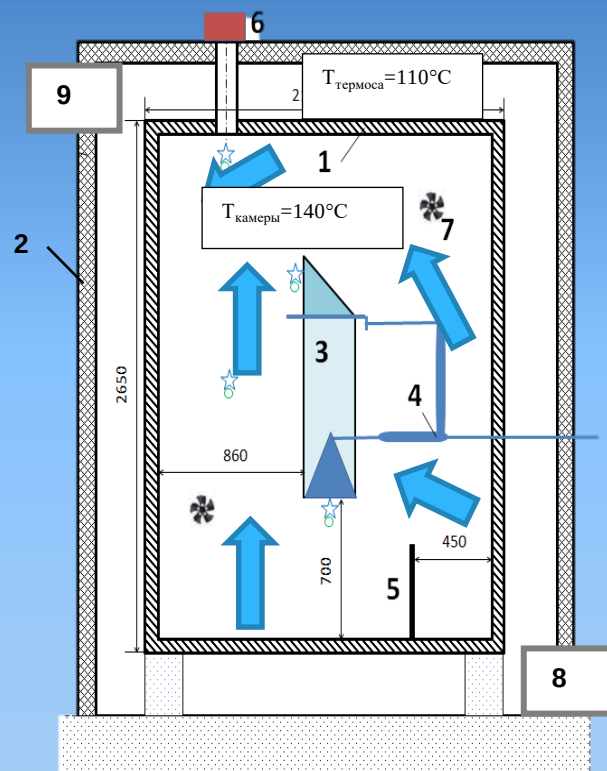
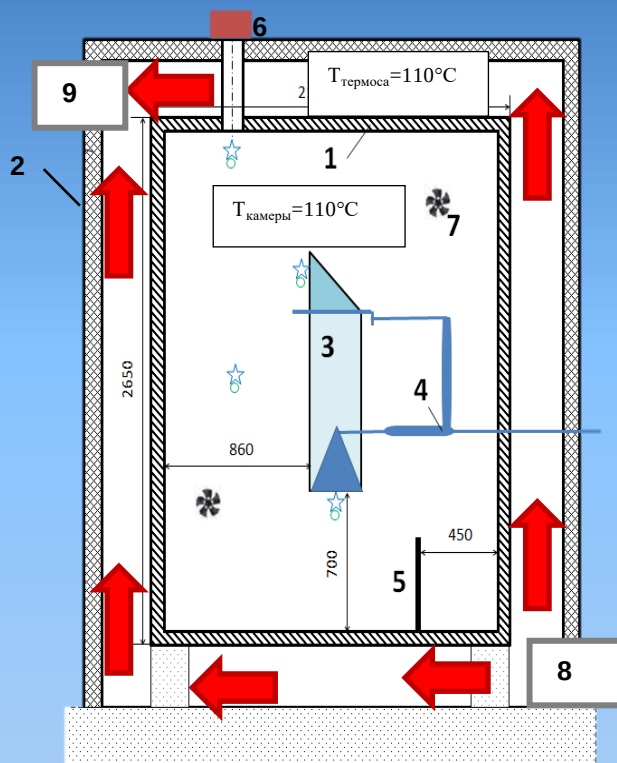
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КАМЕРЫ БМ-П

№	Момент времени,с	Максимальная температура,°С	
		Работа рекомбинатора и системы охлаждения	Работа рекомбинатора без системы охлаждения
1	460	358.4	372.9
2	570	398.4	418.7
3	860	437	460
4	1710	456	471.8

Сравнение результатов расчетов с включенной и выключенной системой охлаждения показывает:

- Выключенная система охлаждения в камере благодаря своей значительной теплоемкости влияет на температурное поле внутри камеры, понижая максимальную температуру газовой смеси, проходящей через нее;
- Включенная система охлаждения понижает максимальную температуру газовой смеси в камере до 20°С, а среднюю температуру газовой смеси до 40°С;
- Для увеличения эффективности работы системы охлаждения следует понизить температуру воздуха в теплообменнике или увеличить его размеры.

КОНСТРУКЦИЯ И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА В КАМЕРЕ БМ-ЛР



1-контейнер; 2-термос; 3-рекомбинатор; 4-устройство открытия/закрытия входов рекомбинатора; 5-труба для подачи газов; 6-клапан сброса давления; 7-вентилятор; 8-тепловая пушка, 9-выпускное отверстие

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В КАМЕРЕ БМ-ЛР

Установка предварительно прогревается тепловыми пушками до 110°C, затем заполняется смесью водород пар–воздух. Начальная температура 110°C соответствует возможной температуре при развитии сценария тяжелой аварии «малая течь». Для предотвращения окисления водорода на поверхности катализатора до начала эксперимента рекомбинатор находится в закрытом состоянии.

Эксперимент начинается в момент открытия входов рекомбинатора. После начала работы рекомбинатора в установку непрерывно подается смесь водорода, пара и воздуха с концентрациями газов, соответствующими стартовому составу.

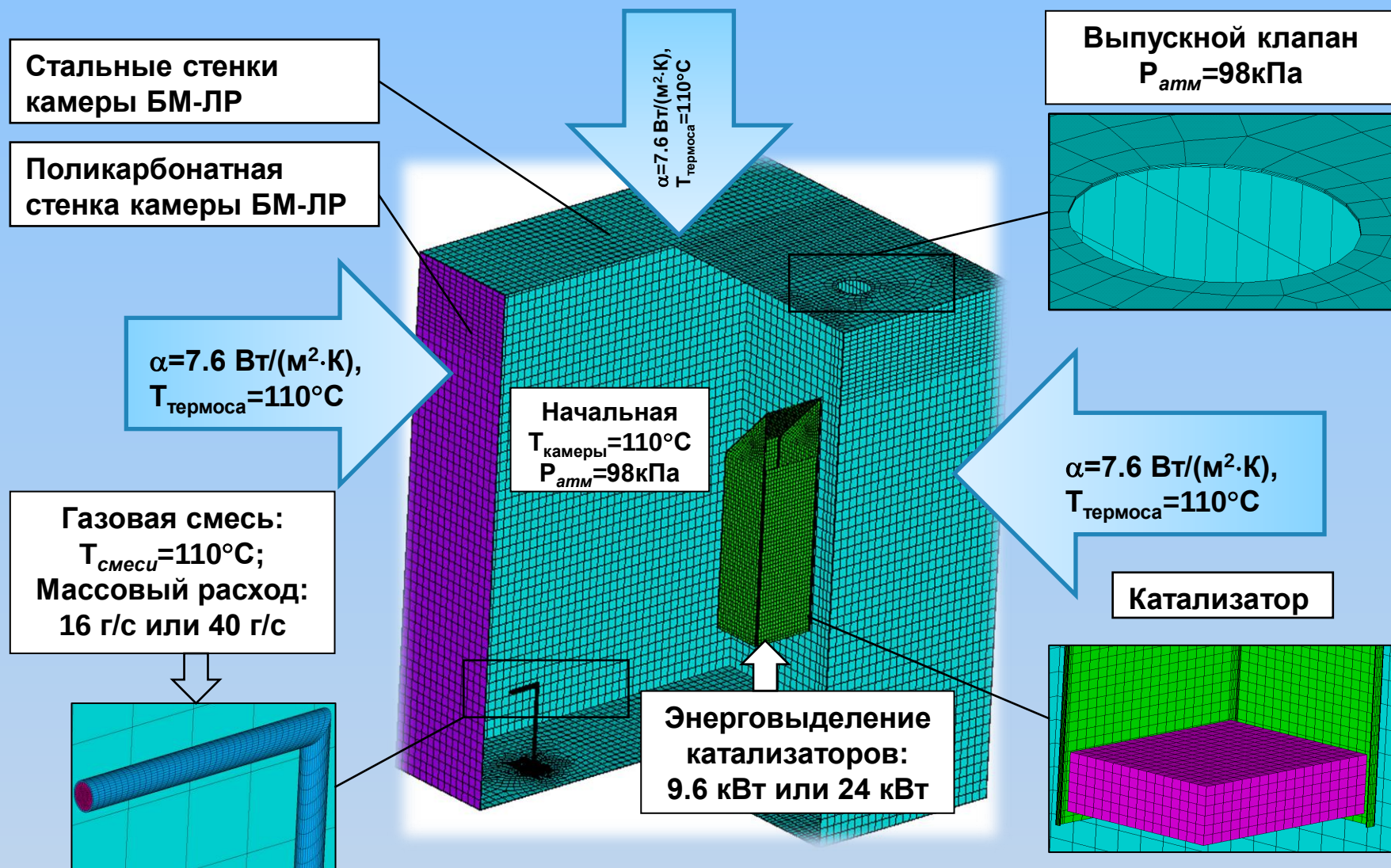
БМ-ЛР непрерывно обдувается тепловыми пушками (температура воздуха 110°C).

Эксперимент продолжается до момента:

- 1) превышения температуры смеси в установке значения 140°C (плавление поликарбоната начинается при 150°C);
- 2) воспламенения смеси в установке.

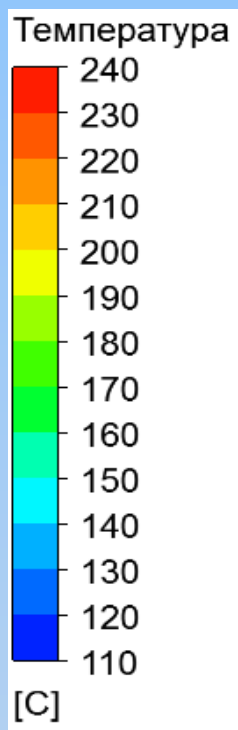
После завершения эксперимента подачу газов прекращают, установка продувается воздухом или азотом.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ КАМЕРЫ БМ-ЛР

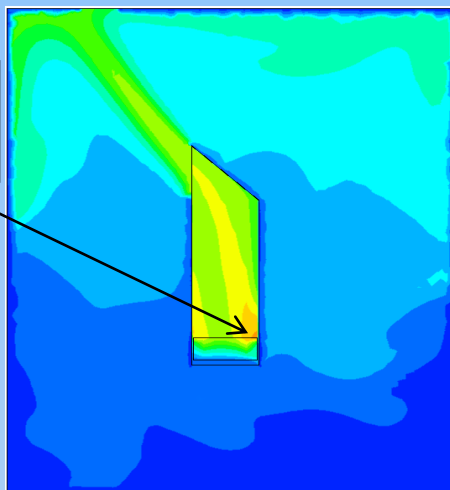


РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КАМЕРЫ БМ-ЛР

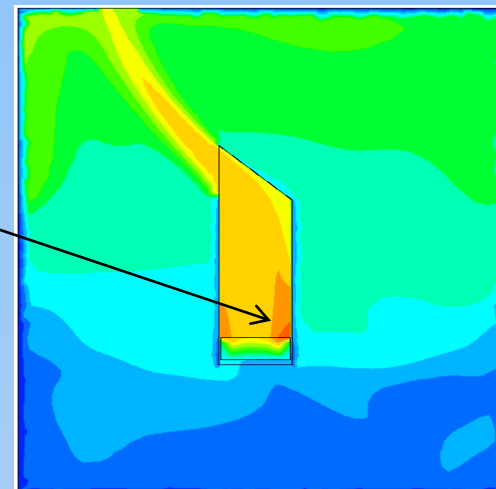
Температурные поля камеры БМ-ЛР и рекомбинатора на различные моменты времени при режиме энерговыделения 9.6 кВт (°C)



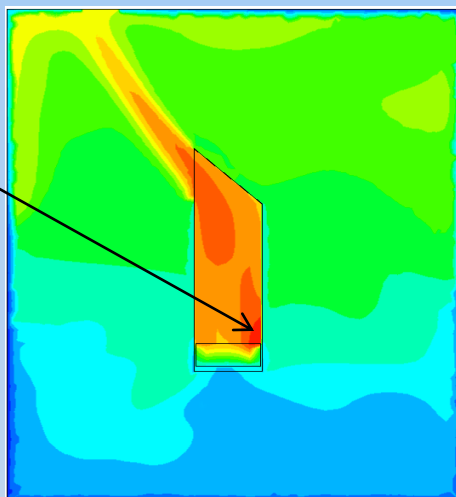
2 минуты,
214°C



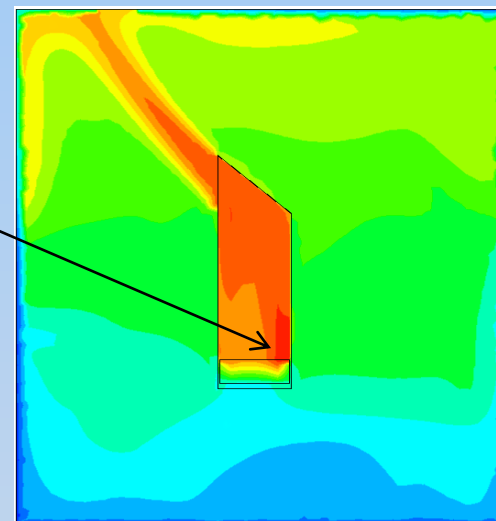
4.5 минуты,
224°C



8.5 минут,
236°C



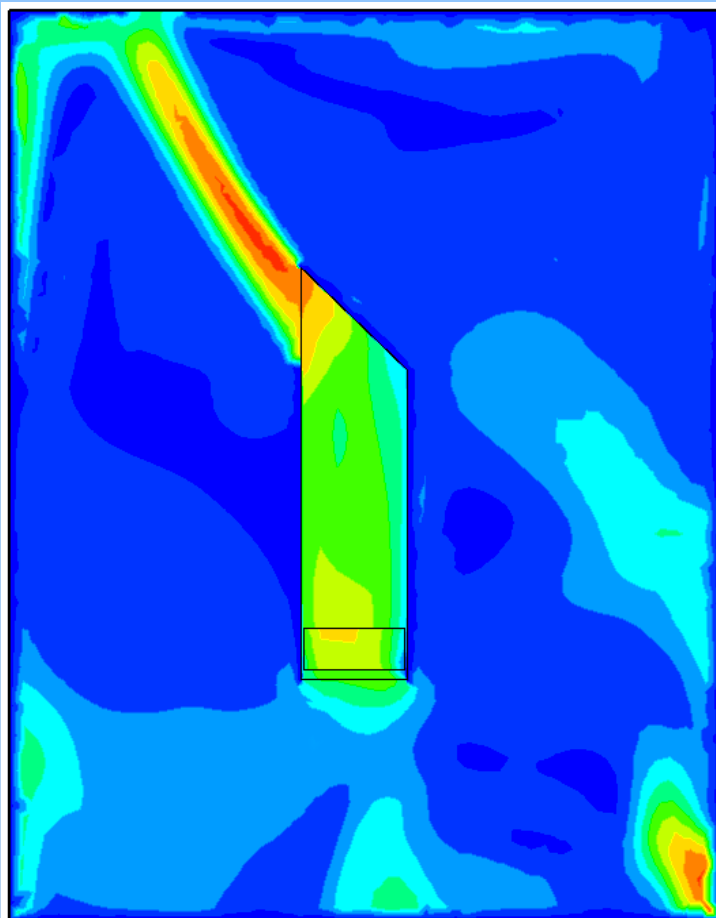
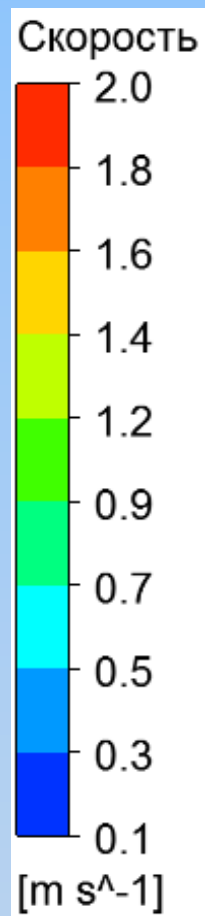
12 минут,
240°C



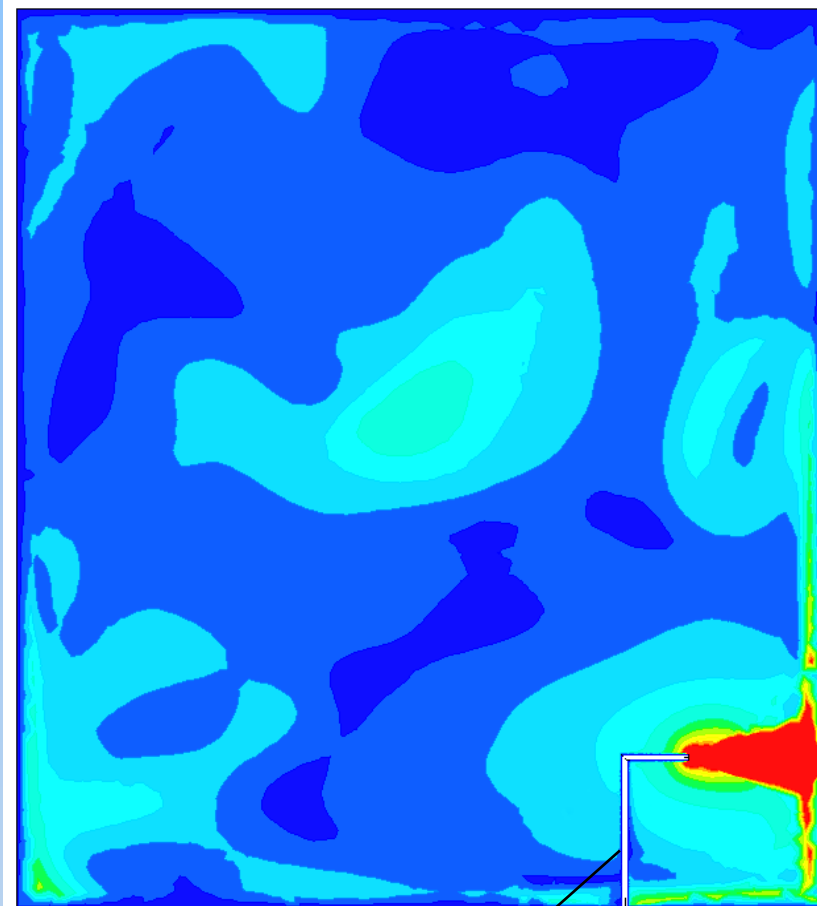
Вертикальное сечение
проходящее через центр
рекомбинатора

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КАМЕРЫ БМ-ЛР

Поля скоростей воздуха в камере БМ-ЛР и рекомбинаторе на момент времени 8.5 минут при режиме энерговыделения 9.6 кВт (м/с)



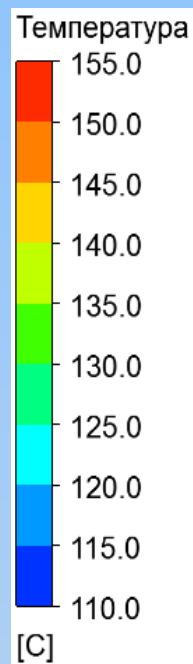
Вертикальное сечение проходящее через центр рекомбинатора



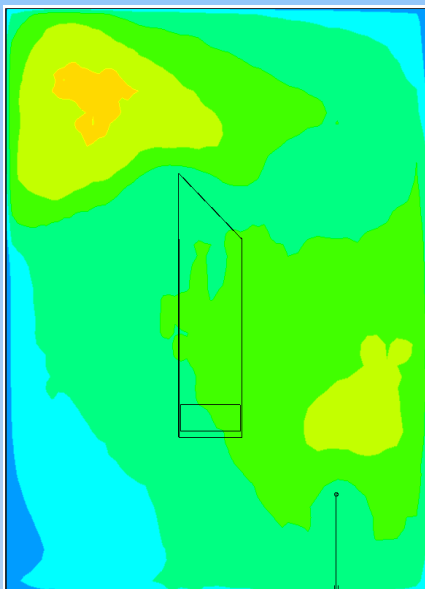
Труба подачи газовой смеси

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КАМЕРЫ БМ-ЛР

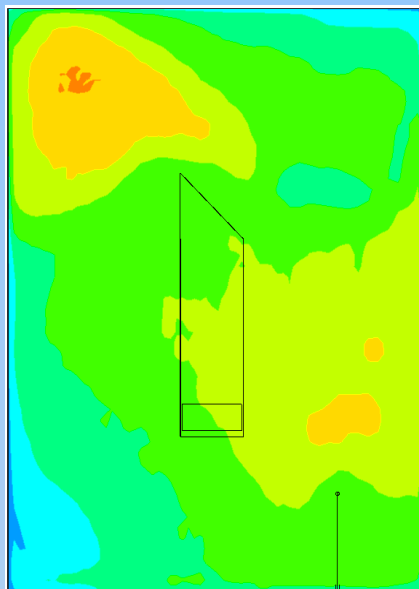
Температурные поля поликарбонатной стенки камеры БМ-ЛР на различные моменты времени при режиме энерговыделения 9.6 кВт (°C)



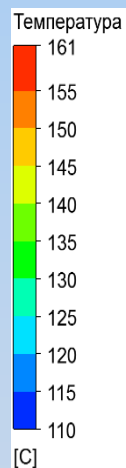
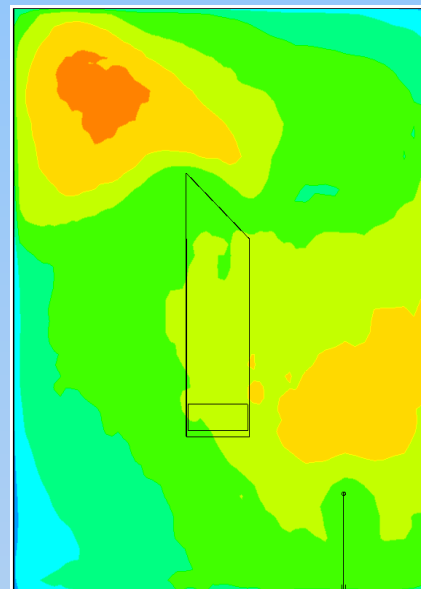
6.5 минут, 140°C



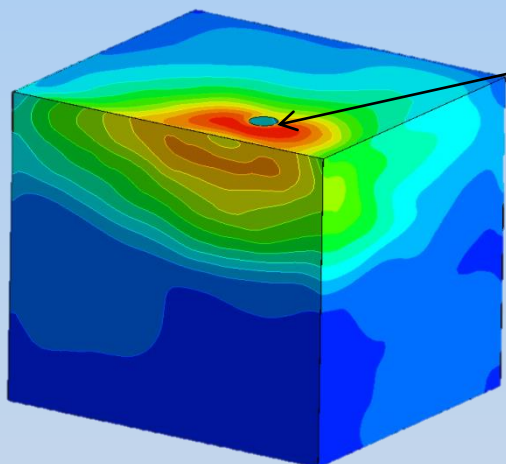
10 минут, 145°C



12 минут, 147°C



12 минут, 161°C

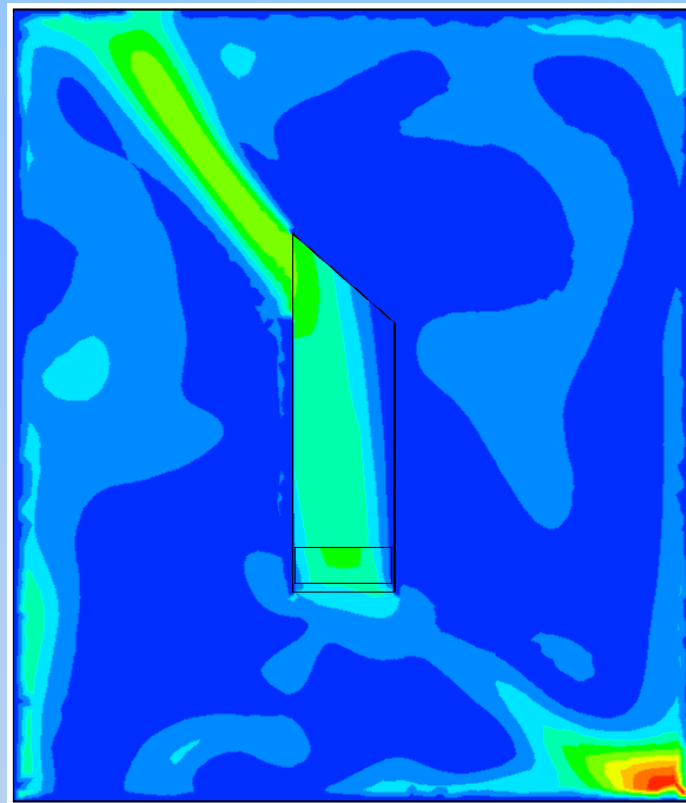
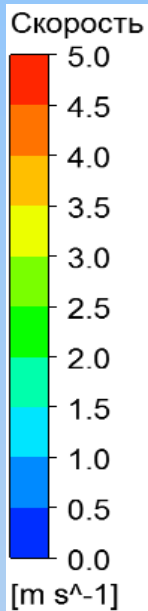
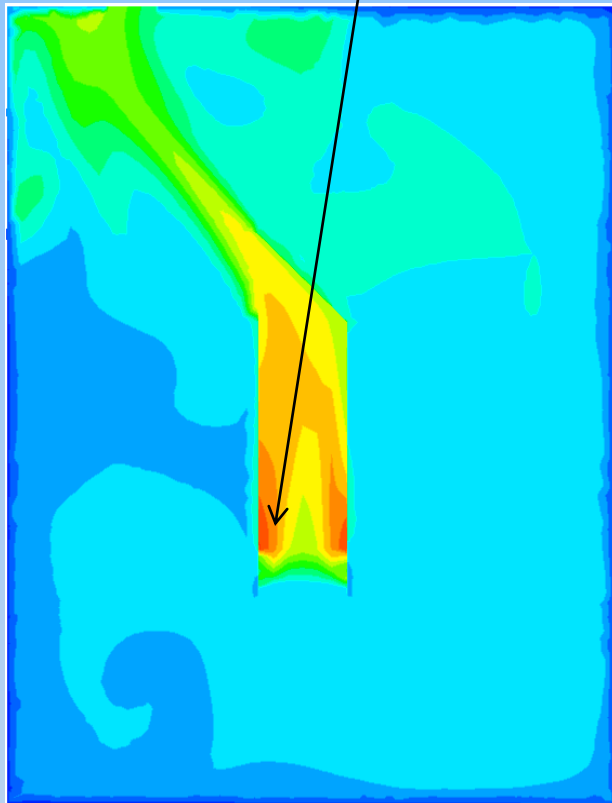
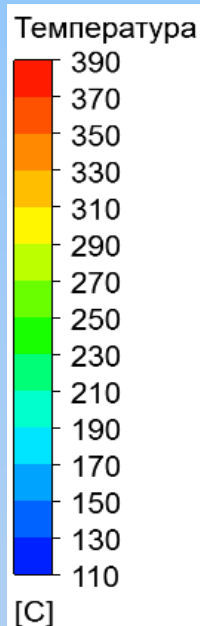


Температурное поле металлических стенок камеры БМ-ЛР при режиме энерговыделения 9.6 кВт (°C)

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КАМЕРЫ БМ-ЛР

Температурное поле и камеры БМ-ЛР и рекомбинатора и поле скоростей воздуха при режиме энергоснабжения 24 кВт (°C)

10 минут, 386°C



Вертикальное сечение проходящее
через центр рекомбинатора

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КАМЕРЫ БМ-ЛР

В работе проведены расчетные исследования температурных полей камеры БМ-ЛР при различных режимах работы рекомбинатора.

При режиме энерговыделения в катализаторе 9.6 кВт максимальная температура катализатора составляет 245°C на момент времени 12 минут, максимальная температура воздуха 240°C. Металлические стенки камеры нагреваются до 161°C, стенка из поликарбоната не достигает температуры плавления.

При режиме энерговыделения в катализаторе 24 кВт максимальная температура катализатора составляет 386°C, значение температуры воздуха 383°C. Температура плавления 150°C на поликарбонатной стенке достигается через 3 минуты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе для двух экспериментальных установок БМ-П и БМ-ЛР определены температурные поля и поля скоростей для различных режимов работы рекомбинатора. Проведены оценки эффективности системы охлаждения камеры БМ-П.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Предприятие Госкорпорации «Росатом»