

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Коган Иоанн Лазаревич



**МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО
КАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ГИДРИРОВАНИЯ
МЕЖПЛАНЕТНОГО ПИЛОТИРУЕМОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ
ИМИТАЦИОННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность: 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство
летательных аппаратов

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Сорокин Андрей Евгениевич

кандидат экономических наук, доцент

Москва - 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СИСТЕМА ПЕРЕРАБОТКИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНОГО ПИЛОТИРУЕМОГО АППАРАТА	8
1.1 Технологии переработки диоксида углерода	9
1.2 Аппаратное оформление технологии	16
1.3 Реакция гидрирования диоксида углерода	23
1.4 Протекание реакции гидрирования в автотермическом режиме	28
1.5 Общая постановка задачи исследования	32
ГЛАВА 2 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО- ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЛОКА ГИДРИРОВАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА	34
2.1 Описание экспериментального стенда	34
2.2 Контролируемые параметры и средства измерения	38
2.2.1 Контролируемые параметры	38
2.2.2 Средства измерения	39
2.2.3 Обработка экспериментальных данных	39
2.3 Конструкции экспериментальных реакторов	39
2.4 Результаты экспериментальных исследований	42
ГЛАВА 3 ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЕАКТОРА ГИДРИРОВАНИЯ	56
3.1 Формализованное описание реактора гидрирования	56
3.2 Программная реализация	67
3.3 Результаты натурного эксперимента верификации модели	71
3.4 Результаты испытаний	78
ГЛАВА 4 ВЫБОР ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА ГИДРИРОВАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА	80
4.1 Обобщенная методика выбора конструктивных параметров блока гидрирования диоксида углерода	80

4.2 Результаты синтеза морфологического описания	85
4.3 Формализованное описание аппаратов блока гидрирования	86
4.4 Результаты моделирования работы блока гидрирования	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	104
ПРИЛОЖЕНИЕ А Внешний вид испытательного стенда и основные технические характеристики	112
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Принципиальная схема испытательного стенда	115
ПРИЛОЖЕНИЕ В Контрольно-измерительное оборудование испытательного стенда	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Иерархия подпрограмм	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акты об использовании результатов исследований ..	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время пилотируемое освоение космического пространства переходит из околоземной области к осуществлению межпланетных полетов, связанных с длительным автономным пребыванием экипажа на борту КА [44].

В перечне критических технологий российской космической программы системы обеспечения жизнедеятельности и защиты организма человека занимают одно из приоритетных мест и определяют потенциальные возможности дальнейшего освоения человеком дальнего космоса [41]. Интегрированная система жизнеобеспечения на основе частичного преобразования продуктов метаболизма в исходные компоненты среды обитания с учетом потребляемых компонентов и запасных частей будет иметь массу, по приблизительным оценкам, доходящую до половины всего полезного груза межпланетного корабля для предполагаемого полета на Марс длительностью в 1000 суток [1].

В условиях жесткой ограниченности массы и объема космического аппарата основным принципом построения систем обеспечения жизни и деятельности экипажа ставится восстановление необходимых экипажу веществ из продуктов жизнедеятельности. Обеспечение экипажа кислородом неразрывно связано с его регенерацией из выдыхаемого углекислого газа.

Степень разработанности темы исследования.

По данным работ [51, 58] переработку диоксида углерода можно наиболее эффективно реализовать по реакции Сабатье – каталитического гидрирования диоксида углерода с образованием метана и воды, далее используемой для получения кислорода электролитическим разложением, а образовавшийся при этом побочный продукт – водород – идет на проведение реакции Сабатье.

Основным элементом системы переработки диоксида углерода, определяющим ее производительность, является каталитический реактор, в котором совместно с химическим превращением протекают процессы тепло- и массопереноса, оказывающие существенное влияние на его работу [40].

Проектирование систем КА ведется десятками различных организаций и проводится за многие годы до выбора полетного задания. В условиях неопределенности условий миссии, таких как численность экипажа, параметры атмосферы и бортовых систем КА и т.д., актуальной задачей становится разработка методики проектирования блока гидрирования, обеспечивающего высокую производительность во всех диапазонах изменяющихся параметров среды на борту КА.

Цели и задачи исследования.

Цель – разработка обобщенной методики расчета технологических параметров блока гидрирования диоксида углерода как части системы жизнеобеспечения межпланетного пилотируемого аппарата.

Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:

- 1) Проведен экспериментально-теоретический анализ влияния тепловых режимов реактора гидрирования на его производительность.
- 2) Разработано формализованное описание, на его основе создана имитационная модель реактора гидрирования для анализа тепловых режимов.
- 3) Проведен выбор конструктивных параметров экспериментального реактора гидрирования и верификация разработанной имитационной модели на основе натурного эксперимента.
- 4) Разработана на основе созданной имитационной модели методика выбора конструктивных параметров блока гидрирования.
- 5) Выполнено экспериментальное подтверждение основных положений методики на основе натурного эксперимента на разработанном образце блока гидрирования.

Научная новизна исследования.

Научную новизну работы определяют:

- имитационная модель для выбора проектно-конструктивных параметров градиентного реактора гидрирования с односторонним рекуператором на основе «ячеечной» гидродинамической структуры;

- имитационная модель блока гидрирования для анализа нестационарных режимов функционирования на основе применения модифицированной теории конечных автоматов при составлении функциональных описаний алфавитов внутренних состояний вспомогательных аппаратов и служебных бортовых систем;
- новые экспериментальные данные о тепловых режимах блока гидрирования, полученные в натуральных и смоделированных экспериментах;
- оригинальная конструкция реактора гидрирования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическую и практическую значимость работы составляет созданная обобщенная методика выбора проектно-конструкторских параметров блока гидрирования с неизотермическим каталитическим реактором на основе имитационной модели и предложенная конструкция реактора.

Методология и методы исследования.

Методологически исследования основаны на математическом моделировании физических процессов, протекающих в блоке гидрирования, с последующим экспериментальным подтверждением результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты исследований имеющихся и разработанных образцов блоков реакционных аппаратов;
- обобщенная методика выбора проектно-конструкторских параметров блока гидрирования с неизотермическим реактором;
- экспериментальные данные, полученные на основе натуральных и компьютерных экспериментов.

Степень достоверности и апробация результатов.

Положения, выдвинутые по результатам имитационного моделирования, подтверждены в ходе натуральных экспериментов.

Результаты работы внедрены в АО «НИИхиммаш» при создании блока гидрирования диоксида углерода системы переработки диоксида углерода в ходе выполнения эскизного и технического проектов. Отдельные разделы работы используются в учебном процессе МАИ при чтении лекций по дисциплинам «Регенерационные системы жизнеобеспечения», «Системы обеспечения жизнедеятельности и защиты экипажей» и «Расчет и конструирование аппаратов систем жизнеобеспечения», а также при проведении курсового и дипломного проектирования.

Промежуточные результаты обсуждались на: 13-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» – г. Москва 2014 г.; XX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, 10-14 ноября 2014 г. в ОАО РКК «Энергия» г. Королев, Московская обл. 2014 г.; XX международной научной конференции «Системный анализ управление и навигация» – Евпатория 2015 г.; 66th International Astronautical congress - Jerusalem Israel 2016 г.; XVI Конференции по космической биологии и медицине с международным участием, Москва 2016 г.; XXI международной научной конференции «Системный анализ управление и навигация» – Евпатория 2016 г.; XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов в РКК «Энергия», г. Королев, Московская обл. 2017 г.; XXII международной научной конференции «Системный анализ управление и навигация» – Евпатория 2017 г.; Научно-практической конференции «Технологии жизнеобеспечения и техносферной безопасности человека» – Тамбов 2018 г.; 17-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика - 2018»; XIII международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» – Москва 2019 г.; на заседаниях Научно-технического совета АО «НИИхиммаш» 2014-19 гг.; на заседании кафедры «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасности жизнедеятельности» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

ГЛАВА 1 СИСТЕМА ПЕРЕРАБОТКИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНОГО ПИЛОТИРУЕМОГО АППАРАТА

Технологическая структура интегрированной регенеративной системы жизнеобеспечения (ИРСЖО)¹ как абиотической части эколого-технической системы (ЭТС) межпланетного пилотируемого аппарата (МПА) при полетах к планетам солнечной системы будет основана на физико-химических процессах преобразования продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания (рисунок 1.1).

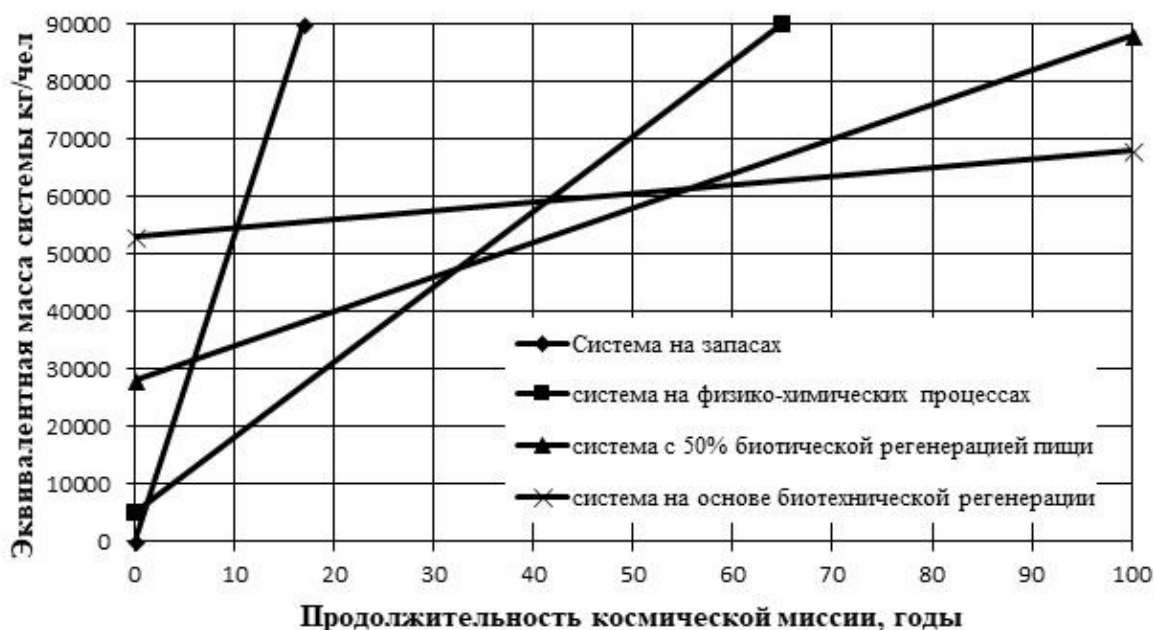


Рисунок 1.1 – Целесообразность использования СЖО, основанных на различных принципах, исходя из их эквивалентной массы [59]

¹ Термин «интегрированная регенеративная система жизнеобеспечения» применяется для определения целостности системы в отличие от термина «комплекс систем жизнеобеспечения», обозначающий совокупность.

Введение в технологическую структуру ИРСЖО системы переработки выдыхаемого экипажем углекислого газа позволяет увеличить степень замкнутости комплекса.

Система переработки диоксида углерода позволяет восстановить кислород из диоксида углерода и вернуть его в цикл. Целевым продуктом работы системы чаще всего является вода как источник кислорода в связанном виде. Для ее получения наибольшее распространение получило химическое взаимодействие углекислого газа с водородом.

Каждым членом экипажа для дыхания в среднем ежедневно потребляется 0,84 кг кислорода, для воспроизводства которого требуется разложить 0,94 л воды в электролизере с получением побочного водорода массой в 0,11 кг, а при дыхании выделяется 1,0 кг углекислого газа в сутки [1].

Введение в состав системы переработки диоксида углерода позволит уменьшить расход воды из запасов на генерацию кислорода с 2,85 л/сут до 1,1 л/сут для экипажа численностью 3 человека, или же до 2,2 кг/сут для экипажа, численностью 6 человек. Экономия полезной массы от применения системы за время 1000-суточной миссии составит, соответственно, для экипажа 3 человека – 1750 кг, и для экипажа 6 человек – 3500 кг [41].

На данный момент переработка диоксида углерода признана критической технологией для Российской пилотируемой космонавтики, и развернуты активные работы по ее внедрению на МКС для летных испытаний и дальнейшему применению для перспективных КА [44].

1.1 Технологии переработки диоксида углерода

Основные технологии переработки диоксида углерода, в соответствии с функциональной классификацией, приведены на рисунке 1.2 [51].

Из вышеприведенных технологий для регенерационных систем жизнеобеспечения проводились исследования по применению следующих методов:

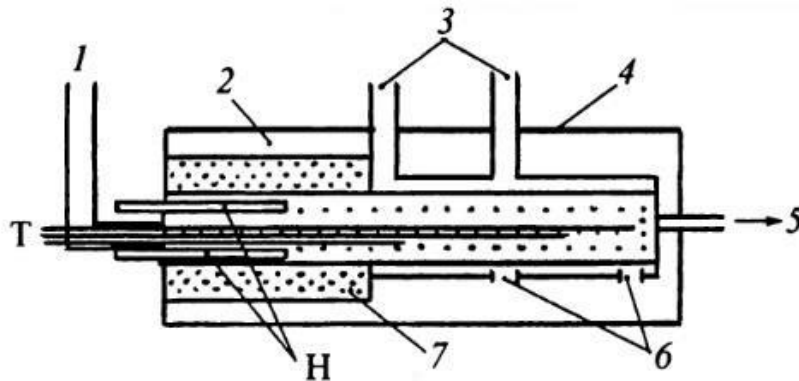
- термokatалитического преобразования с образованием газообразных продуктов – реакция Сабатье [34,57];
- термokatалитического преобразования с образованием углерода как тупикового продукта – реакция Боша [67];
- термokatалитического преобразования с образованием органических веществ, чаще всего метанола [3];
- электрохимического разложения диоксида углерода в высокотемпературном электролизере [54];
- конверсии диоксида углерода с использованием плазмохимических технологий [18, 64, 65].



Рисунок 1.2 – Основные технологии переработки диоксида углерода

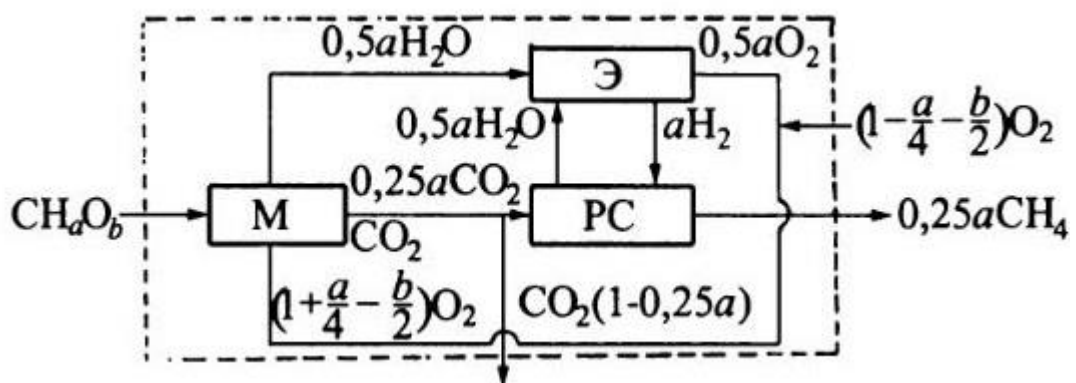
Из приведенных выше технологий наиболее изучено и показывает большую эффективность каталитическое преобразование углекислого газа при повышенной температуре [57].

Термокаталитическое преобразование диоксида углерода с образованием газообразных продуктов (рисунок 1.3). Реакция Сабатье (реакция гидрирования) протекает при относительно низких температурах ($\approx 310-380^\circ\text{C}$) в присутствии катализатора с выделением тепла.



1 – подача газа на переработку; 2 – реакционная зона; 3 – рубашка охлаждения; 4 – теплоизоляционный кожух; 5 – отвод продуктов реакции; 6 – каналы подвода охлаждающего воздуха в рубашку; 7 – теплоизолирующая рубашка; Н – нагреватель; Т – датчики температуры

a



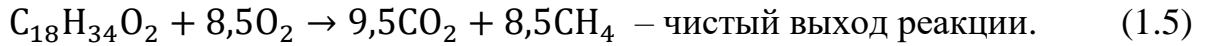
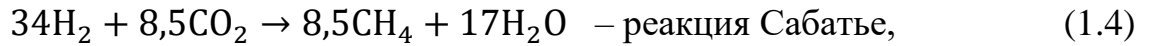
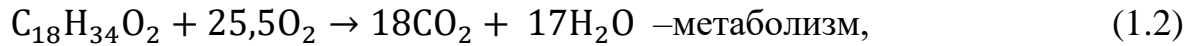
Э – электролизер воды; РС – реактор Сабатье; М – метаболизм человека

б

Рисунок 1.3 – Упрощенная конструктивная схема реактора Сабатье и потоки исходных веществ и продуктов реакции

a – реактор, *б* – потоки исходных веществ и продуктов реакции

Применимо к регенеративной системе жизнеобеспечения космического аппарата и метаболизму экипажа можно записать последовательность реакций:



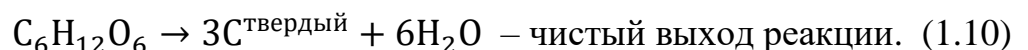
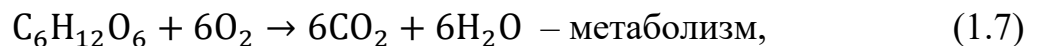
Получаемый побочный продукт – метан – может найти применение в качестве рабочего тела для двигателей ориентации или подвергнут пиролизу с получением водорода и твердого углерода. Реакция пиролиза является эндотермической и требует подвода теплоты $\approx 74,4$ кДж/моль. Существенным недостатком данной реакции является высокая температура ее проведения ($\approx 1030^\circ\text{C}$) и образование на катализаторе твердого, сложно удаляемого углерода, что существенно ограничивает применение данной технологии на борту КА [65].

В настоящее время реакция Сабатье считается приоритетной для систем переработки диоксида углерода [57].

Термокаталитическое преобразование диоксида углерода с образованием твердой фазы. Реакция Боша, так же как реакция Сабатье, является экзотермической. Уравнение реакции Боша имеет вид:



Чистый выход реакции, учитывая метаболизм экипажа и реализацию блока переработки диоксида углерода по реакции Боша, приведен ниже:

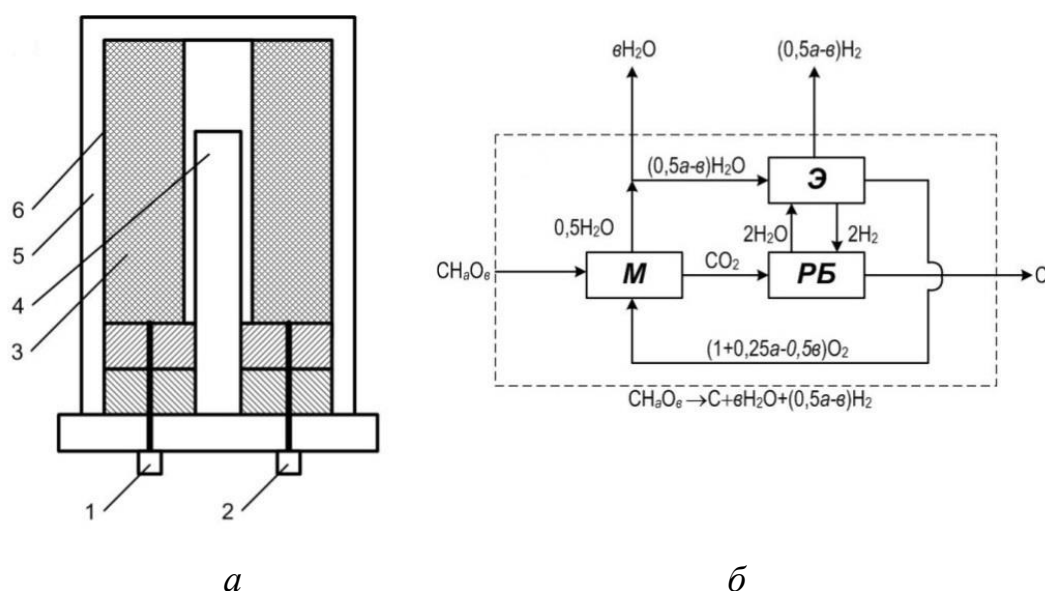


Так как за один проход реагирующей смеси через реактор в реакцию вступает от 10 до 30 % имеющегося в ней CO_2 , то перерабатываемый диоксид углерода после прохода через реактор поступает на его вход на повторную переработку.

Циклическая переработка реагирующей смеси прекращается лишь после того, как содержание CO_2 в ней уменьшится до допустимого уровня.

С целью интенсификации процесса необходимо проводить реакции получения CO и C отдельно на разных катализаторах и при разных температурах, хотя и в одном реакторе [20]. Кроме вышперечисленных основных реакций возможны еще побочные реакции, основными продуктами которых являются метан и вода [34].

Упрощенная схема каталитического реактора Боша [12] и потоки химических веществ в его объеме приведены соответственно на рисунке 1.4.



1 и 2 – штуцер ввода исходных веществ и вывода продуктов реакции; 3 – катализатор; 4 – электронагреватель; 5 – теплоизоляция; 6 – корпус; Э – электролизер воды; РБ – реактор Боша; М – метаболизм человека

Рисунок 1.4 – Упрощенная схема реактора Боша и потоки химических веществ
а – реактор, б – потоки химических веществ в реакторе

При прочих равных условиях эффективность реакции Боша существенно ниже, чем реакции Сабатье, вследствие чего реактор имеет большие габариты и энергопотребление.

Электрохимическое разложение диоксида углерода в высокотемпературном электролизере. Прямое разложение диоксида углерода путем его высокотемпературного электролиза является одним из наиболее перспективных

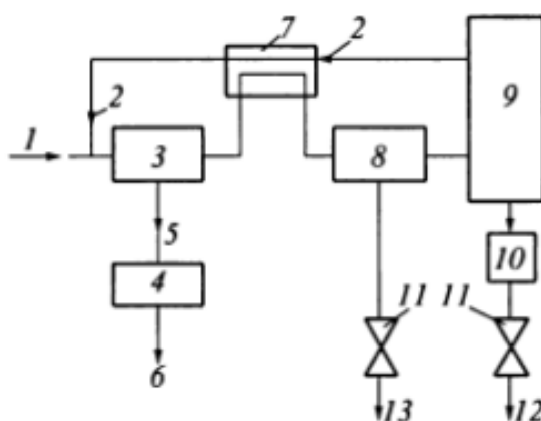
методов для замкнутых систем регенерации кислорода. В качестве катализатора используются твердые керамические электроды с нанесенным покрытием.

При этом на аноде образуется оксид углерода, а на катоде кислород. Вторая стадия процесса – реакция Будуара с образованием твердого углерода и диоксида углерода:



Технологический процесс протекает при температуре 800 – 900°C. Электролитом служит композиция из оксида циркония (около 40 %) с добавками оксидов ванадия или иттрия. Металлокерамические электроды выполнены на основе платины и оксида циркония.

Упрощенная схема переработки углекислого газа на основе высокотемпературного электролиза приведена на рисунке 1.5.



1 – поток входящего концентрированного углекислого газа; 2 – углекислый газ с рециркуляции; 3 – электролизер; 4 – фильтр очистки кислорода; 5 – кислород с выхода электролизера; 6 – подача чистого кислорода в отсек; 7 – теплообменник рекуператор; 8 – отделитель кислорода; 9 – реактор Будуара; 10 – сборник углерода; 11 – дренажный клапан; 12 – углерод в отходы; 13 – сброс водорода на дальнейшее использование

Рисунок 1.5 – Упрощенная схема переработки углекислого газа на основе электролиза

Обоснование выбора технологии. Применение реакции гидрирования диоксида углерода водородом с целью повышения степени замкнутости по кислороду изучается с 1964 г. Для выбора технологии применялась следующая

совокупность функциональных количественных и качественных показателей эффективности [57, 58]:

Количественные показатели:

- стартовая масса системы с учетом ЗИП;
- объем гермомодуля, занимаемый системой с учетом ЗИП;
- энергопотребление;
- нагрузка на систему обеспечения теплового режима;

Качественные показатели:

- безопасность экипажа;
- уровень технической готовности;
- время технического обслуживания;
- ремонтпригодность;
- сложность технологической структуры;
- уровень шума при эксплуатации;
- выделение вредных микропримесей.

Результаты анализа используемых и разрабатываемых технологий переработки диоксида углерода позволяют сделать вывод, что из возможных технологий для космических систем жизнеобеспечения наиболее отработана и исследована технология на основе термокаталитического гидрирования с образованием газообразных продуктов (реакция Сабатье), позволяющая переработать до $\approx 66\%$ CO_2 выделяемого экипажем. Функциональный количественный показатель эффективности, характеризующий отсутствие потерь водорода при применении реакции Боша нивелируется малой степенью превращения, которая не превышает 10–15% за один проход исходных веществ, следствием чего являются высокие массоэнергетические затраты, сложная система рециркуляции газов, образование твердого углерода, трудноудаляемого из аппарата и снижающего активность катализатора, а также высокий температурный уровень процесса (выше 500°C), что не желательно для межпланетного космического аппарата [16].

1.2 Аппаратное оформление технологии

Впервые в отечественной космонавтике технология переработки углекислого газа по реакции Сабатье была реализована в опытном образце системы переработки углекислого газа до газообразных продуктов СПУ-ГВ [5], спроектированной для ОКС «Мир» и прошедшей наземную отработку в 1985 г. На практике, в условиях орбитального космического полета, данная технология реализована в блоке гидрирования CRA, разработанном компанией «Hamilton Sundstrand», и являющимся частью интегрированной системы жизнеобеспечения *IRLSS AC MKC* (2010-2016 гг.) [54]. Опытные образцы агрегатов для реализации данной реакции отработаны в наземных условиях в системе *AirBus ACLS* [61], системе *JAXA ARS* японского космического агентства, разрабатываемой для установки в модуле *JEM* [52].

Внешний вид и принципиальные схемы реализованных систем и их блоков приведены далее.

Реактор гидрирования блока CRA состоит из двух ступеней: «горячей», имеющей электронагреватель для зажигания реакции гидрирования, и «холодной», обеспечивающей увеличенную степень превращения, в обеих ступенях использован рутениевый катализатор на носителе Al_2O_3 (рисунки 1.6 – 1.8) [61].

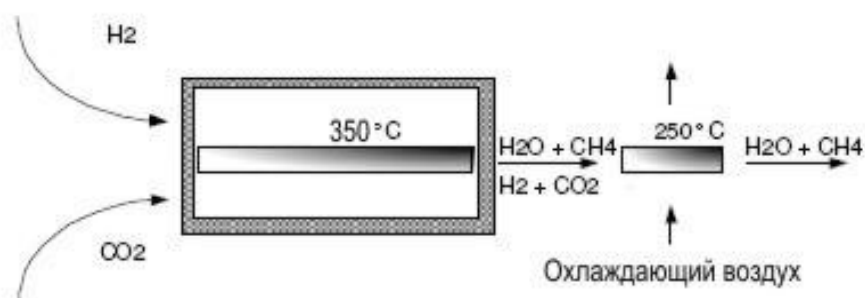


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема блока CRA американского сегмента

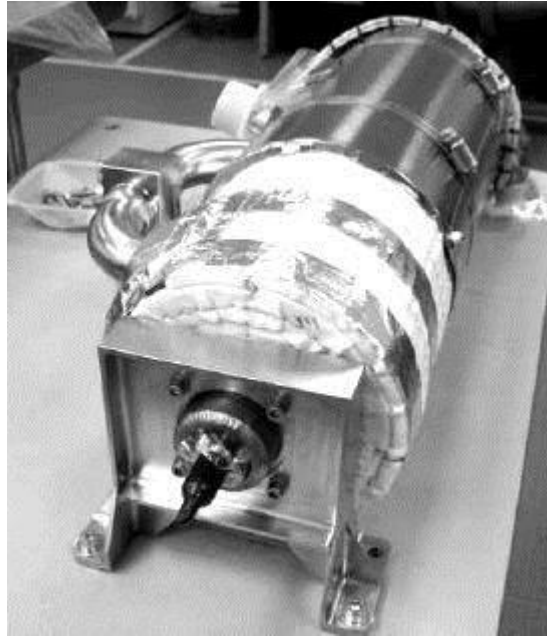
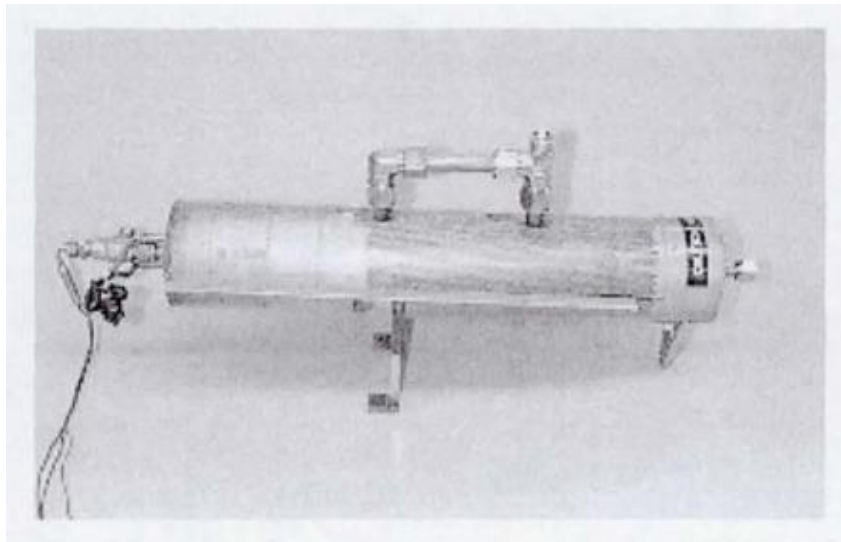
*a**б*

Рисунок 1.7 – Внешний вид блока реакционных аппаратов CRA [60]:
a – с теплоизоляцией, *б* – без теплоизоляции

Близким аналогом CRA является система, разработанная в 90-х годах компанией *TDA Research* (США) для NASA. Основным конструктивным отличием является то, что реализована рекуперация тепла: для охлаждения продуктов реакции используется водород, далее направляемый в адсорбер CO_2 при его регенерации термическим способом, позволяя сократить затраты энергии на работу систему (Рисунок 1.8).

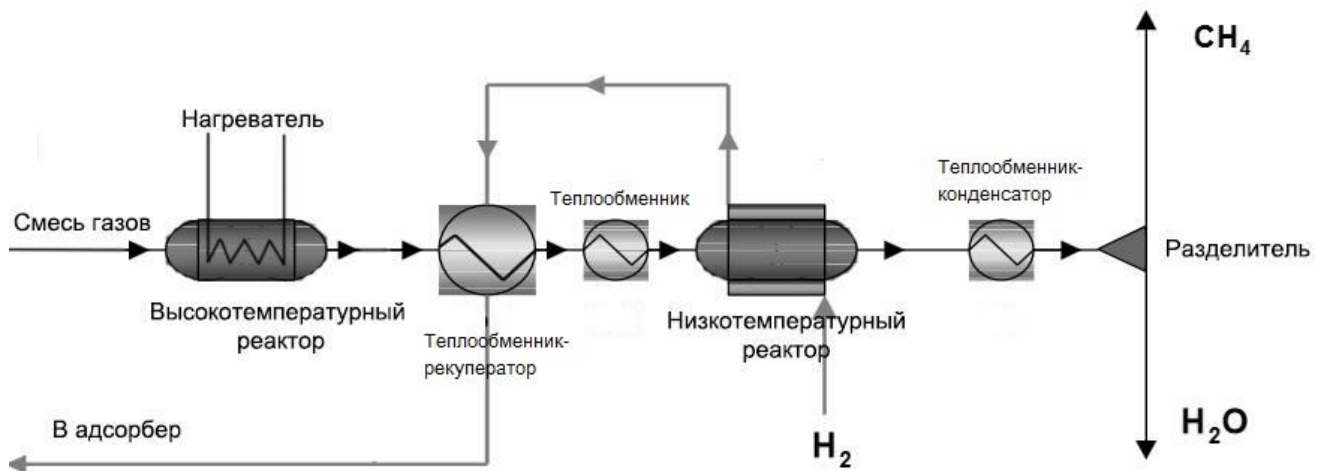


Рисунок 1.8 – Схема блока гидрирования с двумя реакторами, разработанного TDA Research [55]

Для европейского модуля МКС Columbus ESA разработан *комплекс систем ACLS*, включающий в себя электролизер, блок концентрирования диоксида углерода и реактор гидрирования. Реактор гидрирования имеет технологическую структуру, схожую с той, что используется в американском блоке CRA: блок реактора гидрирования заполнен рутениевым катализатором на носителе Al_2O_3 и содержит две ступени. Структурная схема и внешний вид показаны на рисунках 1.9, 1.10.

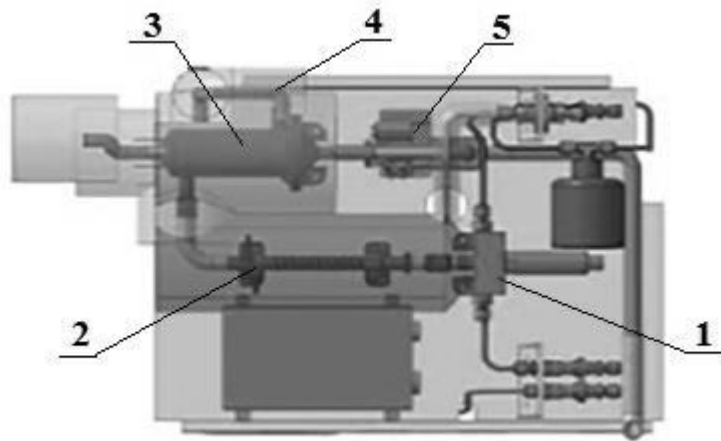


a



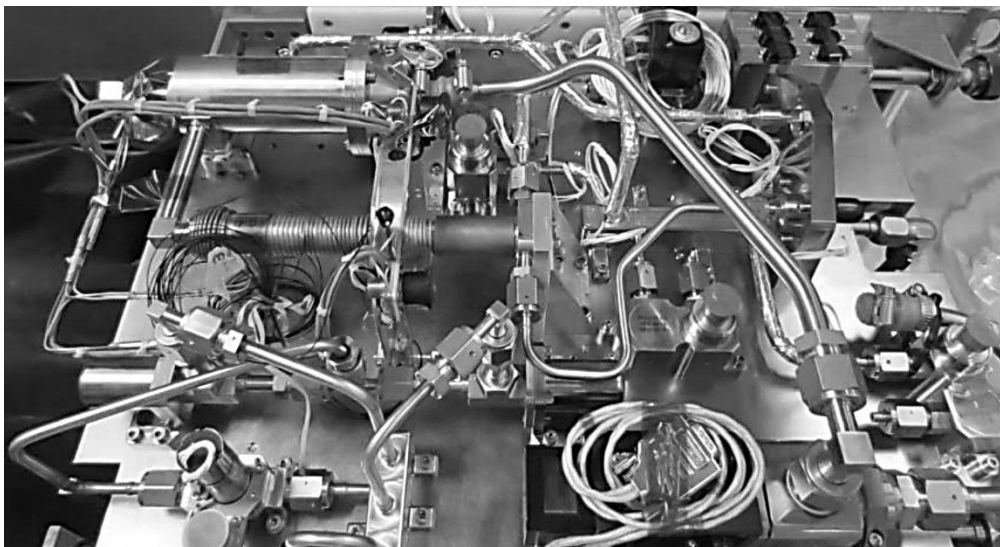
б

Рисунок 1.9 – Образцы реакторов гидрирования ACLS:
а – высокотемпературный реактор, *б* – низкотемпературный реактор



1 – смеситель реагентов; 2 – высокотемпературный реактор («горячая» ступень);
 3 – низкотемпературный реактор («холодная» ступень); 4 – рубашка охлаждения;
 5 – разделитель

а



б

Рисунок 1.10 – Блок гидрирования системы ACLS [68]:
а – конструктивная схема блока гидрирования, *б* – и внешний вид

Для японского модуля *JEM* также разработана *система переработки диоксида углерода JAXA ARS*, ее реактор имеет более простую компоновку: единый объем с катализатором (в отличие от двухступенчатых моделей), рекуператор для подогрева газов на внешней поверхности реактора, внутренний нагреватель (рисунок 1.11). Длина слоя – 240 мм, внутренний диаметр – 19 мм, масса катализатора Ru на Al_2O_3 – 65 г, номинальные расходы реагентов $H_2 = 1,4$ л/мин, $CO_2 = 0,35$ л/мин, на корпусе установлены 15 термопар для контроля температур в слое.

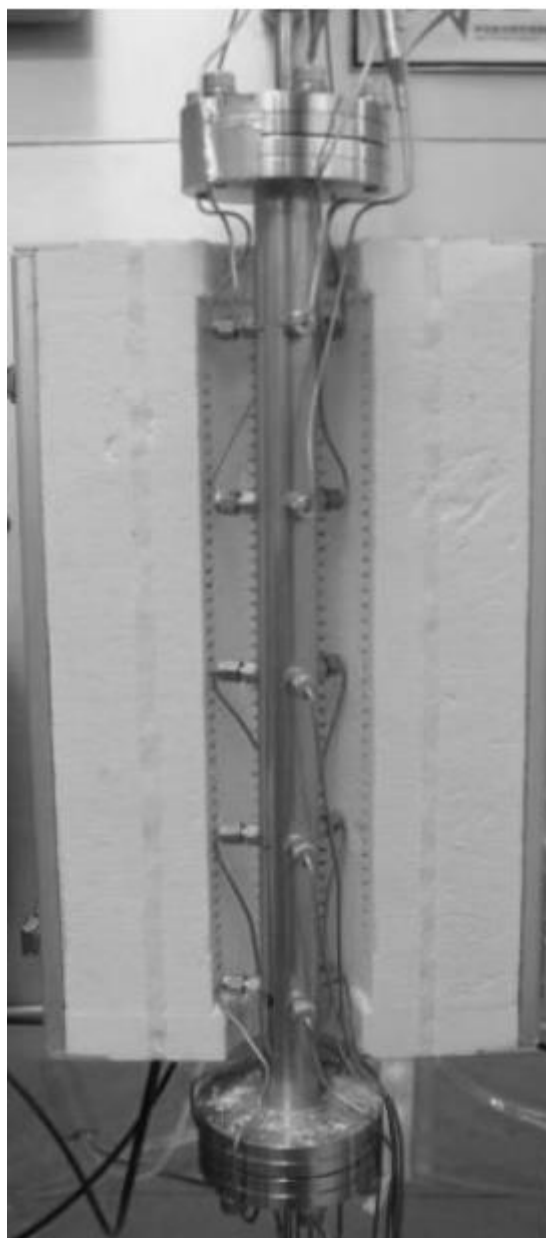
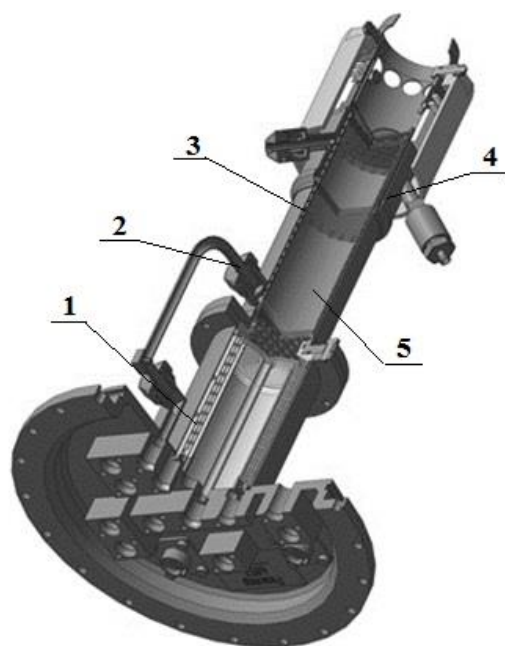


Рисунок 1.11 – Макетный образец реактора JAXA ARS на ранней стадии разработки [66]

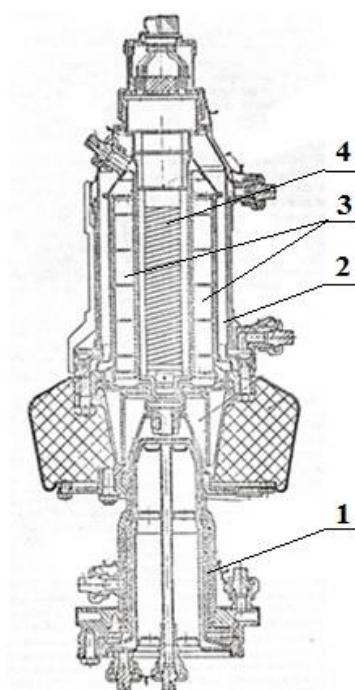
Начиная с 1980-х годов в АО «НИИхиммаш» разработаны несколько прототипов реакторов гидрирования в рамках темы СПУ-ГВ.

Реакторы имели цилиндрическую форму, включали в себя электронагреватель и рекуператор-подогреватель, обеспечивающий подачу подогретого газа, была применена жидкостная система охлаждения продуктов реакции, одновременно обеспечивающая градиент температур, вызывающий образование «холодной» зоны в едином объеме катализатора (рисунок 1.12). Для обеспечения пожаровзрывобезопасности реактор помещался в капсулу, заполненную углекислым газом под повышенным давлением, исключаящую утечку реагентов [39].



1 – теплообменник-конденсатор;
2 – вход реагентов; 3 – подогреватель;
4 – электронагреватель; 5 – зона катализатора

a



1 – теплообменник-конденсатор;
2 – подогреватель; 3 – зона катализатора;
4 – электронагреватель

б

Рисунок 1.12 – Конструктивные схемы реакторов системы СПУ-ГВ:

a – с внешним кольцевым нагревателем, *б* – с внутренним стержневым нагревателем

Конструктивные особенности реакторов обусловлены условиями протекания и поддержания реакции Сабатье, более подробно реакция гидрирования будет описана далее.

1.3 Реакция гидрирования диоксида углерода

Катализаторами процесса гидрирования углекислого газа являются различные металлы (Ni, Co, Cu, Ru, Rh, In, Fe, Ag, Pt, Pd и другие) [34]. В разрабатываемых в настоящее время по всему миру системах переработки углекислого газа с использованием реакции Сабатье отдается предпочтение никелевым и рутениевым катализаторам, нанесенный на основу из Al_2O_3 или $Al_2O_3 + TiO_2$.

Именно на этих катализаторах реализуется возможность протекания процесса с максимальной степенью превращения и в автотермическом режиме, а также исключена возможность протекания нежелательных побочных процессов при соблюдении технологического регламента.

Промышленные никелевые катализаторы требуют восстановления перед использованием, требующим достаточно больших затрат энергии и водорода, в разогретом потоке которого происходит активация (около 1500 л газа и 2000 Вт электроэнергии для нагрева и поддержания температуры 250 мл катализатора в реакторе на период восстановления). Также горячий катализатор пассивируется углекислым газом и продуктами реакции в отсутствие водорода, что влечет за собой необходимость дополнительного расхода водорода на продувку реактора [36].

Результаты анализа условий работы реактора в составе СЖО выдвигают следующие требования к катализаторам:

- высокая активность и селективность в широком диапазоне расходов исходных газов;
- отсутствие требований к регламенту подготовки к работе и завершению процесса;
- сохранение активности в течение длительного срока непрерывной работы и хранения;

- пожаро- и взрывобезопасность, высокая механическая прочность, сохранение работоспособности после воздействия различного рода вибромеханических перегрузок;
- способность проведения процесса при малых временах контакта;
- стабильность каталитических свойств при наличии в исходных газах микропримесей, возможность полного восстановления после отравления.

Учитывая вышеизложенные требования, в качестве катализаторов для проведения реакции гидрирования могут быть применены рутениевые катализаторы, нанесенные на оксид алюминия или титана.

Основа на оксиде алюминия является наиболее отработанной, показавшей высокую производительность и стабильность свойств при соблюдении режима протекания реакции.

Основа на комбинированной основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ti}_2\text{O}$ начала применяться сравнительно недавно, и ей посвящено меньше доступных материалов. Однако, она имеет исключительно положительные отзывы: полупроводниковые свойства диоксида титана позволяют проводить реакцию при более низкой температуре с той же степенью превращения, в сравнении с алюминиевой основой, что делает их использование более перспективным [66]. Проведение реакции с высокой степенью превращения требует не только выбора катализатора с наилучшими свойствами, но и строго соблюдения режима протекания реакции, который выбирается, основываясь на термодинамике процесса гидрирования [37].

Термодинамика процесса гидрирования диоксида углерода. Химические реакции гидрирования диоксида углерода водородом, метанирования оксида углерода водородом, обратной реакции конверсии водяного пара (RWGS) и Боша характеризуются равновесными процессами.

Следовательно, относительное отклонение по составу реагентов и продуктов реакции определяет степень превращения и влияет на кинетику реакции, которые зависят от концентраций.

Для общего уравнения реакции [63]:



константа равновесия может быть записана в виде:

$$K_{a_i} = \exp\left(\frac{\lambda_1}{T^2} + \frac{\lambda_2}{T} + \lambda_3\right). \quad (1.13)$$

Значения коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ для различных реакций переработки диоксида углерода приведены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения коэффициентов зависимости (1.13)

Реакция	Значения коэффициентов		
	λ_1	λ_2	λ_3
Реакция гидрирования $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-730726,0	24125,3	-26,9616
Реакция метанирования $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-538798,1	28062,7	-30,7759
Реакция RWGS $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	-191928,1	-3937,4	3,8143
Реакция гидронизации $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{C(s)} + \text{CO}_2$	-121003,4	16573,0	-17,3858

Зависимость константы равновесия от температуры для четырех реакций представлена на рисунке 1.13.

Результаты анализа рассчитанных значений константы равновесия показывают, что:

— кривые для реакции гидрирования диоксида углерода и реакции метанирования оксида углерода практически совпадают, что подтверждает возможный механизм проведения реакции гидрирования, приведенный ниже, предполагающий, что промежуточные продукты не оказывают существенного влияния на эффективность реакции:



— рост температуры в каталитическом реакторе приводит к резкому увеличению скорости реакции, но вместе с этим достигаемая степень превращения снижается – смесь находится в равновесном состоянии при больших

концентрациях непрореагировавших исходных веществ. Для их преобразования реактор должен работать при более низких значениях температуры в диапазоне 250 – 300°C для сдвига равновесия в область получения наибольшего количества продуктов реакции.

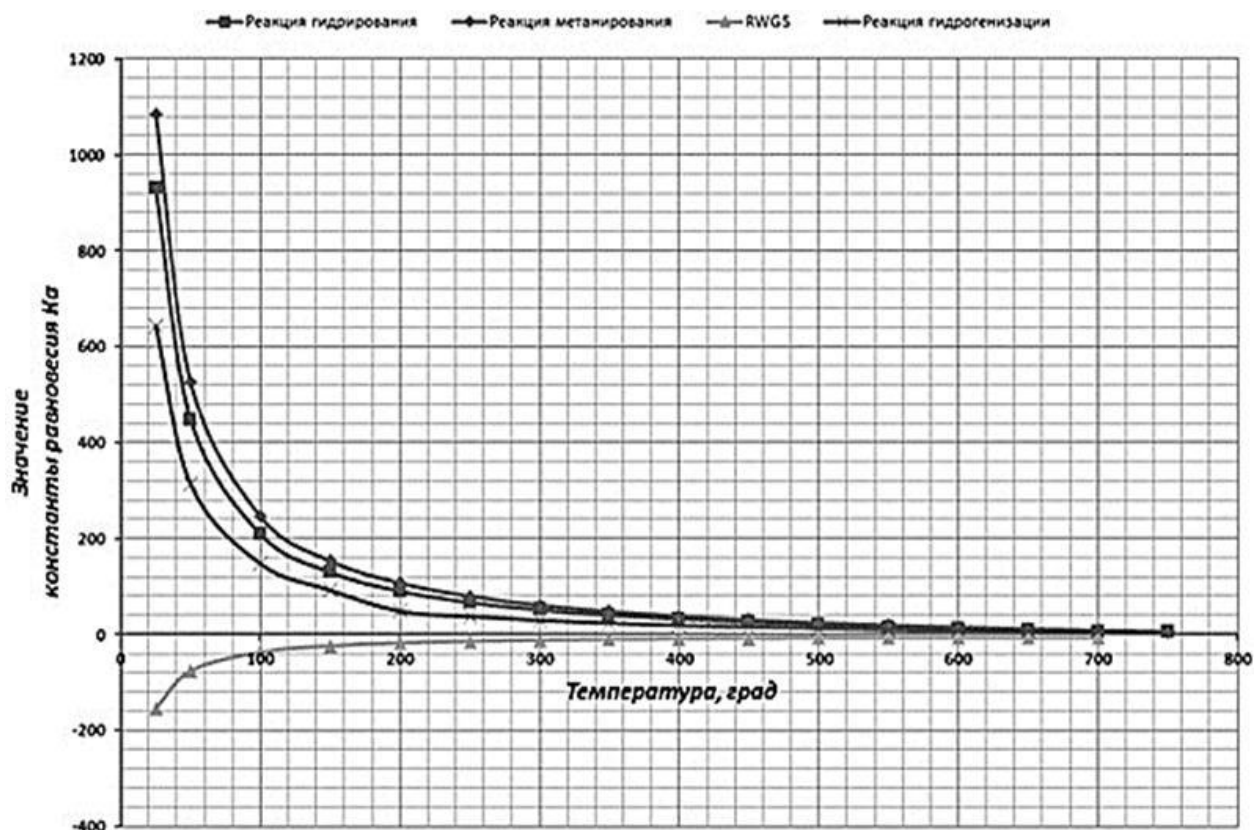


Рисунок 1.13 – Зависимость константы равновесия от температуры

Скорость химической реакции гидрирования диоксида углерода водородом в общем случае определяется из зависимости типа [35]:

$$r_1 = \frac{k_1 K_{CO_2} K_{H_2}^4 z_{CO_2} z_{H_2}^4 P^5}{(1 + K_{CO_2} P z_{CO_2} + K_{H_2} P z_{H_2})^5} (1 - \eta), \quad (1.15)$$

где z_j определяется мольными долями j -компонентов в условиях равновесия, а значение η – из выражения вида:

$$\eta = \frac{1}{K_1 P^2} \frac{z_{CH_4} z_{H_2 O}^2}{z_{CO_2} z_{H_2}^4}. \quad (1.16)$$

Значения других констант, входящих в зависимость (1.15), зависят от типа катализатора. Для наиболее изученного катализатора Ni/Al₂O₃ в диапазоне

температур 200 – 340°C и диапазона давлений 0,1 – 0,3 МПа данные константы могут быть определены как:

$$k_1 [\text{моль/гс}] = 1,064 \times 10^{11} \exp \left[-\frac{113497,4}{R_g T} \right], \quad (1.17)$$

$$K_{CO_2} [\text{Мпа}^{-1}] = 9,099 \times 10^{-7} \exp \left[-\frac{69691,8}{R_g T} \right], \quad (1.18)$$

$$K_{H_2} [\text{Мпа}^{-1}] = 9,6104 \times 10^{-4} \exp \left[-\frac{39942,0}{R_g T} \right]. \quad (1.19)$$

Графическая зависимость скорости реакции от температуры приведена на рисунке 1.14.

Для рассматриваемого диапазона температур скорость реакции зависит от давления в зоне реакции. При увеличении давления ее значение возрастает.

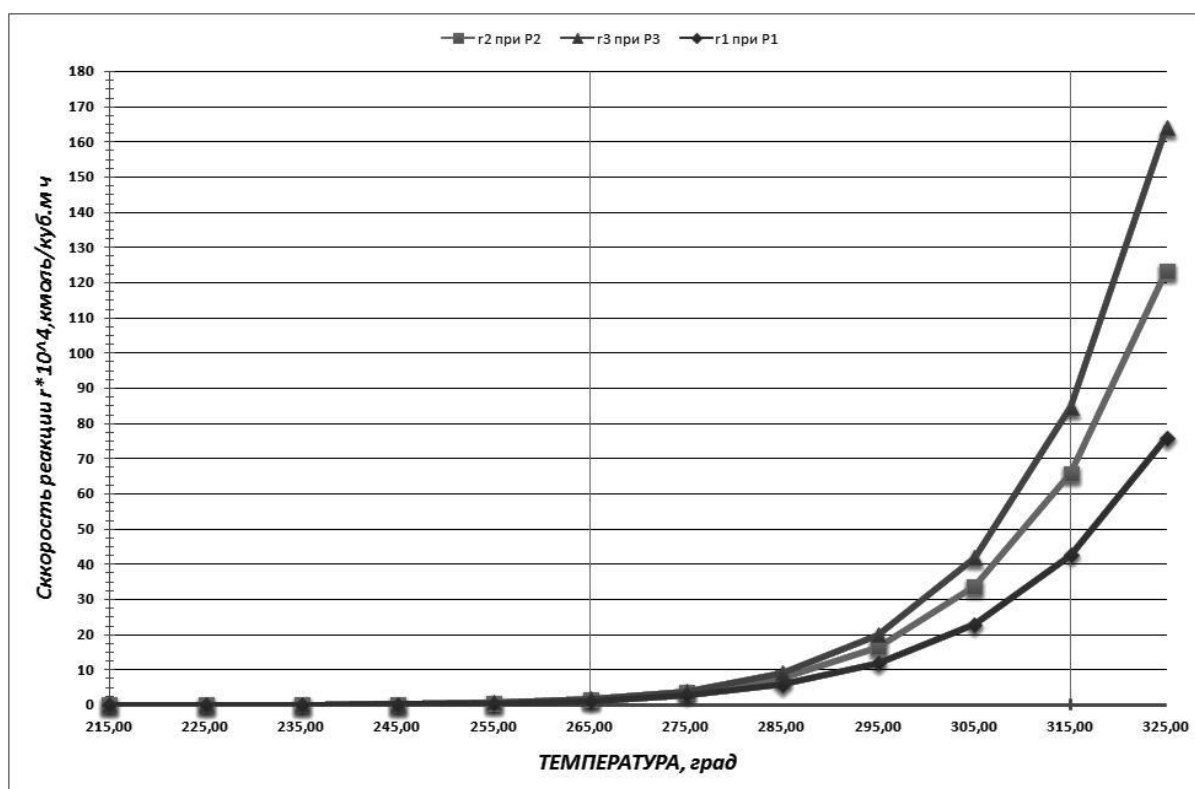


Рисунок 1.14 – Зависимость скорости реакции от температуры для катализатора Ni/Al₂O₃ при стехиометрическом соотношении исходных реагентов

Полуэмпирические формулы для определения скорости реакции приведены также в работах [17, 35, 34].

Возвращаясь к конструкциям реакторов иностранных производителей видно, что все образцы имеют схожую конструкцию, состоящую из двух отдельно

расположенных реакторов. Это выглядит наиболее логичным решением: преобладающий объем исходных веществ реагирует в высокотемпературном реакторе, где скорость реакции максимальна. Затем газовая смесь охлаждается до температуры, при которой достижима высокая степень превращения, а скорость реакции еще не слишком мала, и дожигается во втором низкотемпературном реакторе, при этом в нем реагирует довольно малое количество оставшихся исходных веществ, что требует постоянного подогрева для поддержания заданной температуры, приводя к потреблению дополнительным энергозатратам.

В условиях жесткого ограничения энергопотребления основной концепцией разработки АО «НИИхиммаш» являлась автотермичность протекания процесса – использование только тепла, выделяющегося в ходе реакции с затратами электроэнергии, требуемыми исключительно для зажигания реакции при запуске. Ранее ни один из сторонних разработчиков СЖО не решал такой задачи [62].

Конструктивным решением этой задачи стало совмещение условий высокотемпературного и низкотемпературного реакторов в одном слое катализатора, конструкция реакционного аппарата должна обеспечить профиль температур, наиболее близкий к достижению кинетики реакции, обеспечиваемой двумя отдельными реакторами.

1.4 Протекание реакции гидрирования в автотермическом режиме

При проведении реакции гидрирования рост температуры приводит к значительному увеличению скорости процесса и, соответственно, выделения теплоты. Для снижения энергетических затрат проведение экзотермических реакций выгодно проводить в автотермическом режиме, когда требуемая температура катализатора обеспечивается исключительно за счет выделяющейся теплоты экзотермической реакции без подвода тепловой энергии извне.

Существуют две предельные температуры (нижний и верхний пределы), между которыми целесообразно проводить процесс. Нижним пределом является температура, при которой скорость реакции (скорость выделения тепла)

достаточны для обеспечения автотермического режима, и уже достигается приемлемая степень превращения для данного процесса. Ниже этого предела скорость тепловыделения будет меньше, чем скорость отвода теплоты, и температура в реакторе будет падать. Верхний температурный предел связан со сдвигом баланса в сторону обратной реакции с ростом температуры, что снижает итоговую степень превращения, а также с нежелательными побочными процессами и термостойкостью катализатора.

В общем виде тепловой баланс для реактора, в котором протекает экзотермическая реакция, имеет вид:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \dot{V}_r \rho C_p (T_0 - T) + kF(T - T_x) - Q_{x.p.}, \quad (1.20)$$

где \dot{V}_r – объемный расход газовой смеси, м³/с;

ρ – плотность газовой смеси, кг/м³;

C_p – теплоемкость газовой смеси, Дж/кг·К;

T_0 – температура газовой смеси на входе в выделенную зону реактора, К;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К;

F – площадь выделенной зоны реактора, м²;

T_x – температура газовой смеси на выходе из выделенной зоны реактора, К;

$Q_{x.p.}$ – тепло, выделившееся в ходе химической реакции, Вт.

Теплосодержание системы складывается из теплоотвода с уходящим потоком, теплопередачи через стенку и тепла химической реакции [33].

Конструкция реактора должна обеспечивать поддержание температуры процесса в указанных выше пределах при различных расходах и соотношениях реагентов, для чего должны выполняться условия устойчивого течения процесса.

Для устойчивости стационарного состояния необходимо, чтобы малые отклонения от равновесной температуры приводили к таким изменениям, которые возвращают реактор в стационарное состояние. Это означает, что если температура становится несколько меньше стационарной, то скорость тепловыделения $Q_1(y)$ начинает превышать скорость теплоотвода $Q_2(y)$; если же температура незначительно превысит стационарную, то $Q_2(y)$ будет больше $Q_1(y)$, иными

словами для устойчивости стационарного состояния необходимо выполнение неравенства [15]:

$$\left(\frac{dQ_1}{dy}\right)_{y=y_s} < \left(\frac{dQ_2}{dy}\right)_{y=y_s}. \quad (1.21)$$

Доказательство необходимости и достаточности выполнения этого неравенства для описания устойчивого процесса приведено в [19].

В случае обратимой экзотермической реакции повышение температуры ускоряет обратную реакцию сильнее, чем прямую, так что равновесие процесса смещается в нежелательную сторону. При некоторой температуре скорость образования целевого продукта проходит через максимум; эта оптимальная температура зависит от состава реагирующей смеси, уменьшаясь по мере уменьшения концентраций исходных веществ [22].

Рассматривая реактор проточного типа, где скорость тепловыделения, в основном, зависит от расхода реагентов, а также благодаря снижению теплового эффекта данной реакции с ростом температуры в зону, находящуюся выше оптимальной области протекания реакции, можно утверждать о возможности конструирования реактора, позволяющего осуществлять течение процесса гидрирования в автотермическом режиме в широком диапазоне расходов реагентов за счет подбора конструктивных решений и размерных характеристик аппарата, позволяющих обеспечить достаточный теплосъем из зоны реакции при температурных уровнях, входящих в зону ее оптимального течения.

Таким образом, вначале, пока еще не велика концентрация конечных продуктов, процесс выгодно вести при высокой температуре, чтобы увеличить скорость прямой реакции, а затем температуру следует снижать, чтобы, сместив равновесие сторону продуктов реакции, добиться максимальной степени превращения.

Математические модели тепловых процессов, протекающих в реакторе.
Для проектирования автотермического реактора с требуемыми характеристиками конструкции целесообразно выполнить построение математической модели,

описывающей тепловые режимы реактора, предназначенной для выбора конструктивных параметров [20].

В доступной научной литературе были найдены несколько примеров моделирования процессов, протекающих в реакторе гидрирования. Их список и основные допущения приведены в Таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Обзор существующих моделей реакторов гидрирования

Источник	Основные допущения модели
1 Носов Д.А. Математическое моделирование при проектировании систем обеспечения жизнедеятельности и безопасности экипажей летательных аппаратов: сб. науч. тр, МАИ, 1984 г. [37]	Изотермический реактор с никелевым катализатором: теплофизические свойства зависят только от состава смеси
2 Гаврилов Л.И. Математическое моделирование процесса теплообмена в каталитическом реакторе Сабатье, Труды МВТУ, 1976 г. [12]	Изотермический реактор с никелевым катализатором, только стационарное состояние, нет описания гидродинамики потока
3 Статья Глебов И.В., Курмазенко Э.А. Прогнозирование функционирования перспективной СОГС для длительных автономных пилотируемых космических полетов, Труды МАИ, 2014 г. [13]	Изотермический реактор с рутениевым катализатором
4 Статья Czupalla M. The Virtual Habitat – A Tool for Dynamic Life Support System Simulations (SAE 2010) [53]	Не изотермический реактор, градиент температур только в продольном направлении, поршневой режим течения <i>Примечание</i> – в модели не указан тип катализатора, выведены полуэмпирические уравнения скорости реакции только для конкретного реактора

В общем случае корпус реактора представляется в виде системы концентрически расположенных цилиндрических стенок. Движение газа в слое катализатора описывалось «моделью идеального вытеснения» или «ячеечной

моделью», уравнения переноса заменяются уравнениями материального и теплового баланса при задании на границах раздела конструктивных элементов граничных условий четвертого рода [12].

Математическое описание с достаточной степенью точности отражает структуру и конструктивные особенности агрегата, а также протекание процессов тепломассообмена в конструктивных элементах. Однако в моделях принято, что реактор изотермический, что существенно отличается от экспериментальных данных, описанных в последующих главах.

1.5 Общая постановка задачи исследования

Результаты вышеприведенного аналитического обзора источников научно-технической информации по выбранной тематике позволяют сделать следующие основные выводы:

1) показано, что формирование технологической структуры интегрированной системы жизнеобеспечения межпланетных космических аппаратов для осуществления длительных космических миссий к планетам солнечной системы должно быть основано на применении физико-химических технологий преобразования продуктов метаболизма в исходные компоненты среды обитания экипажа;

2) обосновано на основе результатов сопоставительного анализа приведенных одиннадцати количественных и качественных показателей, что технология термокаталитического преобразования диоксида углерода до газообразных продуктов воды и метана по реакции Сабатье, при ее проведении в автотермическом режиме, является наиболее перспективной для применения в технологической структуре ИРСЖО межпланетного космического аппарата;

3) рассмотрены условия термодинамического равновесия и автотермического режима проведения данной реакции и показано, что термическая устойчивость данного режима зависит от условий подвода выделяемой в

результате реакции теплоты и ее отвода из реакционной зоны, определяемых конструктивными характеристиками реактора;

4) проведен анализ математических моделей реакторов и показано, что в настоящее время отсутствует формализованное описание данной технологии, учитывающее неизотермичность условий проведения реакции гидрирования, учет которых необходим для создания высокоточной методики выбора конструктивных параметров реактора гидрирования.

На основании обзора информации по данной тематике **целью проведения исследования** становится разработка обобщенной методики расчета технологических параметров блока гидрирования диоксида углерода как части системы жизнеобеспечения межпланетного пилотируемого аппарата.

Для достижения поставленной цели в ходе выполнения данной работы решены следующие основные **задачи**:

1) Проведен экспериментально-теоретический анализ влияния тепловых режимов реактора гидрирования на его производительность.

2) Разработано формализованное описание, на его основе создана имитационная модель реактора гидрирования для анализа тепловых режимов.

3) Проведен выбор конструктивных параметров экспериментального реактора гидрирования и верификация разработанной имитационной модели на основе натурального эксперимента.

4) Разработана на основе созданной имитационной модели методика выбора конструктивных параметров блока гидрирования.

5) Выполнено экспериментальное подтверждение основных положений методики на основе натурального эксперимента на разработанном образце блока гидрирования.

ГЛАВА 2 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЛОКА ГИДРИРОВАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Основной целью данного раздела стало обобщение экспериментальных данных, полученных на ранее разработанном варианте блока гидрирования диоксида углерода. В ходе анализа было выполнено:

- выявление влияния конструктивных параметров реактора гидрирования на тепловой режим функционирования;
- анализ действующих интерфейсов со смежными бортовыми системами;
- выработка практически рекомендаций, обеспечивающих работу реактора в устойчивом «автотермическом режиме».

Все экспериментальные исследования были проведены на базе «АО НИИхиммаш», в рамках работ по разработке системы СПДУ 10628.6947.00.00.000, куратор работ д.т.н., профессор Курмазенко Эдуард Александрович. Использование продуктов коллективного труда «АО НИИхиммаш» и ПАО РКК «Энергия» согласовано на заседании НТС 1/20 от 24 сентября 2020 г.

2.1 Описание экспериментального стенда

С целью проведения испытаний реактора гидрирования и вспомогательных аппаратов блока создан экспериментальный стенд, имитирующий работу блока в условиях, максимально приближенных к эксплуатации на борту КА. Для этого рассмотрены предполагаемые интерфейсы взаимодействия блока гидрирования с бортовыми системами КА (рисунок 2.1).

На основе структуры взаимодействия блока с бортовым оборудованием была разработана структурная схема испытательного стенда, приведенная на рисунке 2.2, внешний вид и характеристики приведены в Приложении А, принципиальная схема – в Приложении Б.

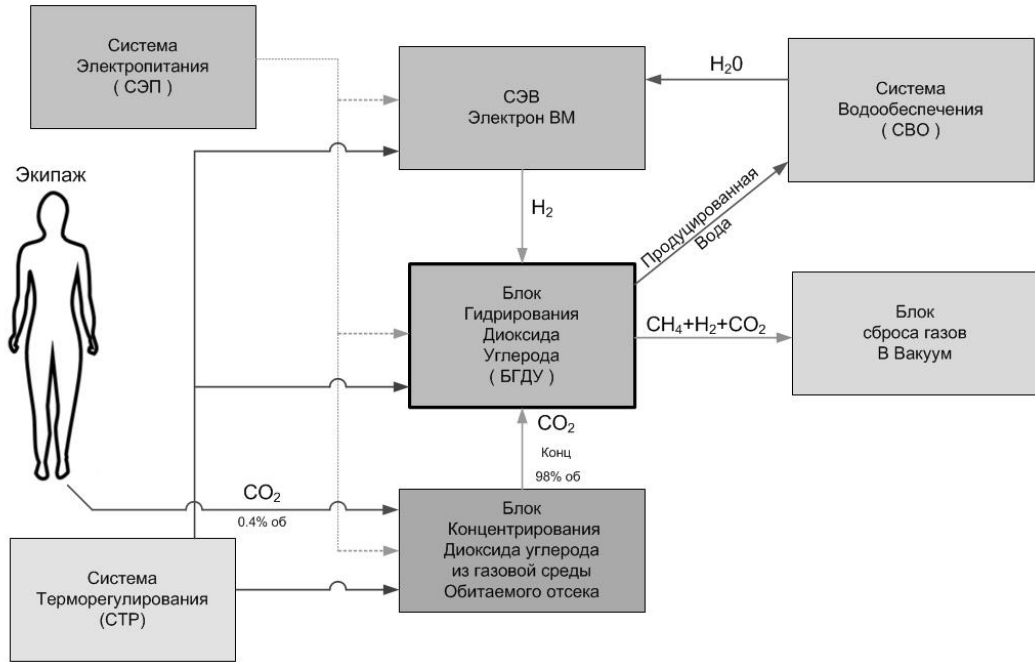
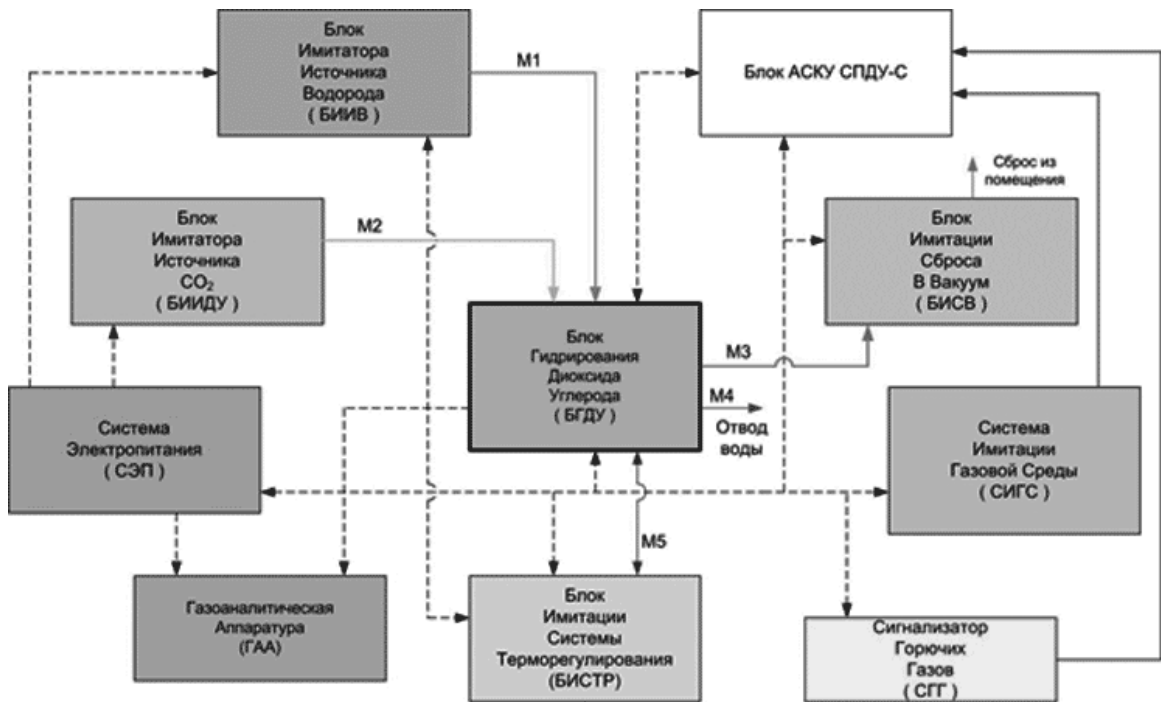


Рисунок 2.1 – Схема взаимодействия блока гидрирования с бортовым оборудованием



Материальные потоки:
 M1. Водород, T=20-25°C, P до 0.14Мпа, Расход до 400л/час
 M2. Углекислый газ, T=20-25°C, P до 0.4Мпа, Расход до 200л/час
 M3. Продукты реакции: CH4, H2O, CO2, H2 T=5-15°C, P до 0.15Мпа, Расход до 400л/час
 M4. Вода, T=5-25°C, P до 0.1Мпа, Расход до 100 г/час
 M5 Теплоноситель T=5-50°C, P до 0.1Мпа, Расход до 80 г/мин

Рисунок 2.2 – Структурная схема испытательного стенда

В соответствии со структурной схемой принято блочное исполнение экспериментального стенда. При этом выделены следующие основные функциональные блоки:

— *Блок имитатора источника водорода (БИИВ)* предназначен для генерации водорода посредством электрохимического разложения воды для дальнейшей его подачи в блок гидрирования. Основным элементом блока является штатная бортовая система генерации кислорода «Электрон-ВМ». Кислород сбрасывается из лабораторного помещения. Водород поступает в реактор для использования в реакции гидрирования.

— *Блок реактора гидрирования (объект испытаний)* предназначен для переработки диоксида углерода по реакции гидрирования (реакции Сабатье) с получением конечных продуктов метана и воды. Для размещения блока гидрирования и вспомогательного стендового оборудования служит стальная рама из прямоугольного профиля с предварительно установленными универсальными крепежными элементами.

— *Блок имитатора системы терморегулирования (БИСТР)* предназначен для имитации бортовой системы терморегулирования, в качестве теплоносителя в нем циркулирует вода, которая, проходя через основные блоки и аппараты стенда, снимает выделившееся тепло, тем самым поддерживая требуемый тепловой режим аппаратов, размещенных на стенде. Расход теплоносителя контролируется двумя электронными датчиками расхода «Взлет ТЭР» Источником расхода и средством регулирования температуры служит промышленный термостат.

— *Блок имитатора сброса в вакуум (БИСВ)* предназначен для имитации сброса в вакуум газообразных продуктов реакции и непрореагировавших веществ, основным элементом БИСВ является насос вакуумный Laborport, с помощью которого происходит создание разряжения, имитирующее забортный вакуум, сброс метана и непрореагировавших газов из блока реактора происходит через регулятор давления.

— *Блок газоаналитической и измерительной аппаратуры (ГАА)* предназначен для определения расхода и чистоты подаваемых газов, анализа содержания компонентов в продуктах реакции. Для этого служат два расходомера El-Flow для контроля массовых расходов подаваемых в блок газов и три газоанализатора «Гамма-100»: на содержание кислорода в подаваемом водороде, на содержание кислорода в углекислом газе, на содержание метана, водорода, углекислого газа в продуктах реакции.

Также в блок входит статический разделитель газожидкостной смеси и весы для измерения расхода (массы) воды, являющейся целевым продуктом реакции гидрирования.

— *Система электропитания (СЭП)* предназначена для электропитания блоков и агрегатов стенда. СЭП обеспечивает подачу к блокам и аппаратам стенда напряжения электросети 220В, 380В переменного тока, и преобразованное напряжение 28В постоянного тока.

— *Блок имитатора источника диоксида углерода (БИИДУ)* предназначен для подачи диоксида углерода. В состав БИИДУ входят баллон с CO_2 и магистраль подачи CO_2 из блока концентрирования диоксида углерода (БКДУ). Основной режим работы осуществляется при подаче CO_2 из БКДУ. Баллоны с углекислым газом служат в качестве альтернативного источника CO_2 .

— *Автоматизированная система контроля и управления (АСКУ)* предназначена для управления блоками и агрегатами стенда с компьютера оператора и протоколирования результатов работы стенда. АСКУ посредством оборудования, расположенного в шкафах контроля и управления и компьютера оператора обеспечивает управление, контроль и предупредительную сигнализацию состояния блоков и аппаратов стенда, осуществляет протоколирование данных и хранение их в системе.

2.2 Контролируемые параметры и средства измерения

2.2.1 Контролируемые параметры

В процессе экспериментальных исследований БГДУ измеряются, регистрируются и вычисляются следующие параметры:

- температура окружающей среды, °С;
- атмосферное давление окружающей среды, мм рт. ст.;
- относительная влажность, %;
- расходы исходных газов (CO_2 и H_2), в $\text{дм}^3/\text{час}$;
- концентрации продуктов реакции (CO_2 , H_2 , CH_4) на выходе из системы после осушки, % объема;
- объем конденсата, выделившийся в ходе реакции, см^3 ;
- температуры в реакторе, °С;
- давления в магистралях и ЕХДУ, МПа;
- напряжение и сила тока на электронагревателе, В, А;
- энергозатраты на работу системы, Вт/час;
- КПД установки (степень превращения по H_2 и выход по воде), %;
- температуры газа на входе и выходе из термохолодильника, °С;
- температуры теплоносителя СТР на входе и выходе из термохолодильника, °С;
- энергопотребление термохолодильника, Вт/час;
- время заполнения мембранной емкости разделителя, мин;
- качество работы механического регулятора соотношения газов, % отклонения;
- величина уноса жидкости из разделителя с газообразными продуктами реакции, $\text{г}/\text{м}^3$;
- перепад давления по газовому контуру на входе и выходе из реактора, мм вод. ст.;

- объем конденсата, выделившегося в ходе реакции, см³/дм³ водорода/углекислого газа/метана.

2.2.2 Средства измерения

Для измерения основных характеристик и показателей на стенде используется контрольно-измерительное оборудование, приведенное в Приложении В.

2.2.3 Обработка экспериментальных данных

Обработка проводилась с учетом систематических погрешностей средств измерения методом доверительных интервалов в программах TableCurve, STATISTICA, MS EXCEL. Источником данных являются автоматически сформированные АСКУ испытательного стенда протоколы испытаний, содержащие все измеряемые параметры, регистрируемые с заданным оператором интервалом времени.

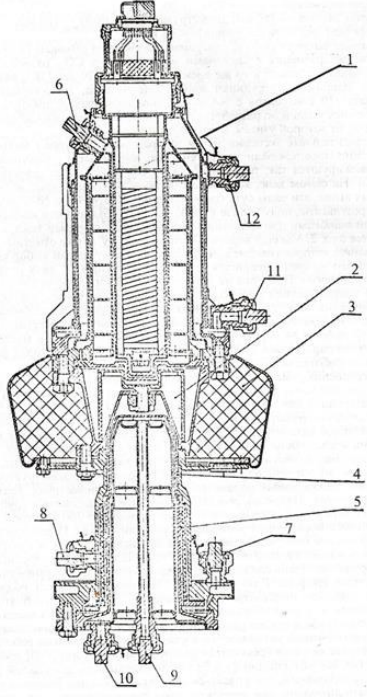
2.3 Конструкции экспериментальных реакторов


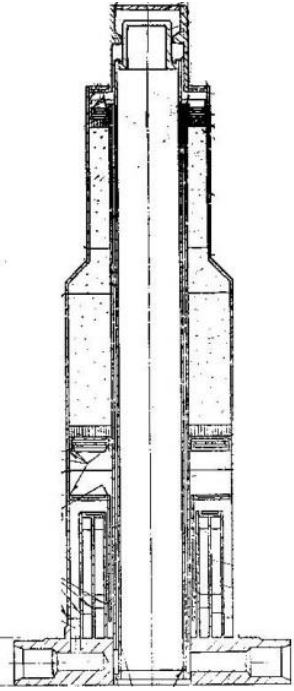
На начальной стадии проведения исследований уже имелись некоторые наработки по конструкции реактора на основе систем «СПУ-ГВ», «Спрут», «Вулкан», разрабатываемых ранее в АО «НИИхимаш» [4], основные характеристики которых приведены в Таблице 2.1.

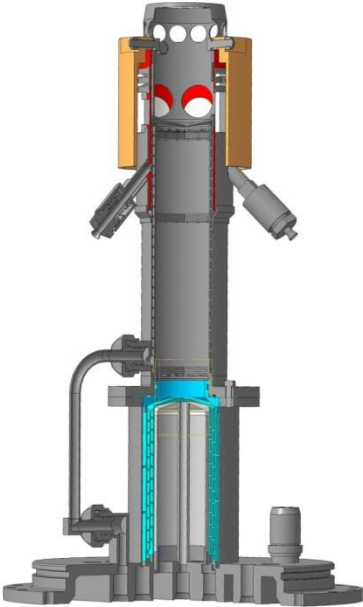
Все реакторы выполнены по схожей конструкции: имеют осесимметричную, цилиндрическую форму, рекуператор-подогреватель входящей газовой смеси, полость с катализатором, газо-жидкостный теплообменник-конденсатор, для охлаждения продуктов реакции, омываемый системой жидкостного охлаждения. Разогрев катализатора до рабочей температуры осуществлялся встроенным

электронагревателем. Типовая конструкция на примере реактора старого образца показана на рисунке 2.3.

Таблица 2.1 - Характеристики реакторов, разработанных в НИИхиммаш

Название системы	Технические характеристики		Конструкция
	Наименование параметра	Значение параметра	
Система утилизации углекислого газа «Вулкан-1» и Система утилизации углекислого газа «Вулкан-2»	Насыпной объем катализатора, см ³	160	
	Высота слоя катализатора, мм	100	
	Катализатор	Ni /Cr ₂ O ₃	
	Нагрузка на СТР, максимальная, Вт	400	
	Время запуска при мощности электронагревателя 300 Вт, мин	5-8	
	Габариты: — высота, мм — диаметр максимальный, мм	380 160	
	Масса в заправленном состоянии, кг	3,6	
Система переработки углекислого газа до газообразных веществ «Спрут-3»	Насыпной объем катализатора, см ³	190	
	Высота слоя катализатора, мм	140	
	Катализатор	Ru /Al ₂ O ₃	
	Нагрузка на СТР, максимальная, Вт	450	

Название системы	Технические характеристики		Конструкция
	Наименование параметра	Значение параметра	
	Время запуска при мощности электронагревателя 300 Вт, мин	12-15	
	Габариты:		
	— высота, мм	510	
	— диаметр максимальный, мм	160	
	Масса в заправленном состоянии, кг	9,6	
Система переработки углекислого газа до газообразных веществ «Спут-4»	Насыпной объем катализатора, см ³	150	
	Высота слоя катализатора, мм	120	
	Катализатор	Ru / Al ₂ O ₃	
	Нагрузка на СТР, максимальная, Вт	400	
	Время запуска при мощности электронагревателя 250 Вт, мин	12-15	
	Габариты:		
	— высота, мм	350	
— диаметр максимальный, мм	130		
	Масса в заправленном состоянии, кг	6,6	

Название системы	Технические характеристики		Конструкция
	Наименование параметра	Значение параметра	
Реактор блока «БГДУ» (вариант 1)	Насыпной объем катализатора, см ³	240	
	Высота слоя катализатора, мм	150	
	Катализатор	Ru /Al ₂ O ₃ Ru /TiO ₂	
	Нагрузка на СТР, максимальная, Вт	200	
	Время запуска при мощности электронагревателя 250 Вт, мин	30-40	
	Габариты:		
	— высота, мм	400	
— диаметр максимальный, мм	260		
Масса в заправленном состоянии, кг	9,2		

2.4 Результаты экспериментальных исследований

Возобновленные испытания реактора гидрирования начались на уже имеющемся блоке гидрирования (вариант 1), показанном на рисунке 2.3. Как и в предыдущих проектах, реактор располагался внутри емкости, заполненной углекислым газом под избыточным давлением (ЕХДУ), одновременно служащей накопителем диоксида углерода для согласования с циклически работающей системой концентрирования, а также выполняющей роль теплоизоляции, и гарантирующей невозможность утечки горючих газов в атмосферу.

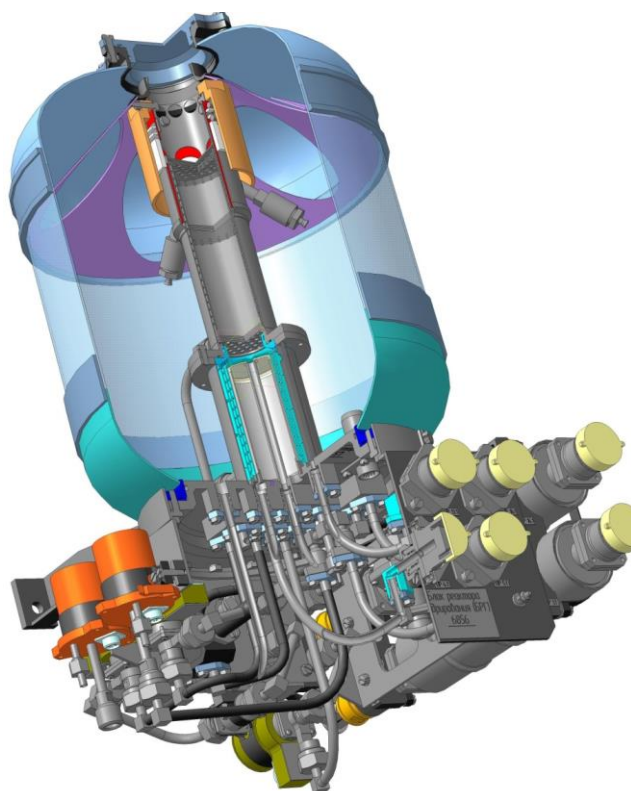


Рисунок 2.3 – Блок гидрирования (вариант 1)

Реактор имел внешний кольцевой нагреватель, что было сделано с целью использования новых нагревательных элементов, выполненных по тонкопленочной технологии, вместо использования нихромовой проволоки, имеющей меньший ресурс и перегреваемой до крайне высоких температур из-за небольшой площади теплообмена непосредственно с нагреваемой частью. Также это позволило увеличить объем катализатора в полости, благодаря отсутствию канала для нагревателя по центру. Рекуператор располагался на наружной стенке полости с катализатором.

Конструкция реактора позволяла многократно менять засыпку, в качестве катализатора поочередно использовались:

- рутениевый катализатор на основе из оксида алюминия – 5P-НС-1;
- рутениевый катализатор на основе из оксида алюминия и диоксида титана – 5P-НС-2;
- никель-хромовый катализатор – НХА.

На начальных этапах испытаний блок реактора не обеспечивал протекания реакции в автотермическом режиме в области низких расходов реагентов, требовался циклический подогрев катализатора для поддержания реакции.

Лишь на расходах более 240:60 л/час водорода и углекислого газа обеспечивалось стабильное течение реакции без подвода внешнего тепла, при этом производительность по воде не превышала 72%.

Испытания проводились на блоке в сборе – реактор находился в емкости с диоксидом углерода, в ходе экспериментов было показано, что с ростом давления в ЕХДУ увеличивается теплосъем с поверхности реактора. Это связано с ростом плотности и, соответственно, интенсификации конвекции и росту теплопроводности углекислого газа, тем самым переменное давление в емкости препятствует стабилизации режима работы реактора, что хорошо видно на рисунке 2.4.

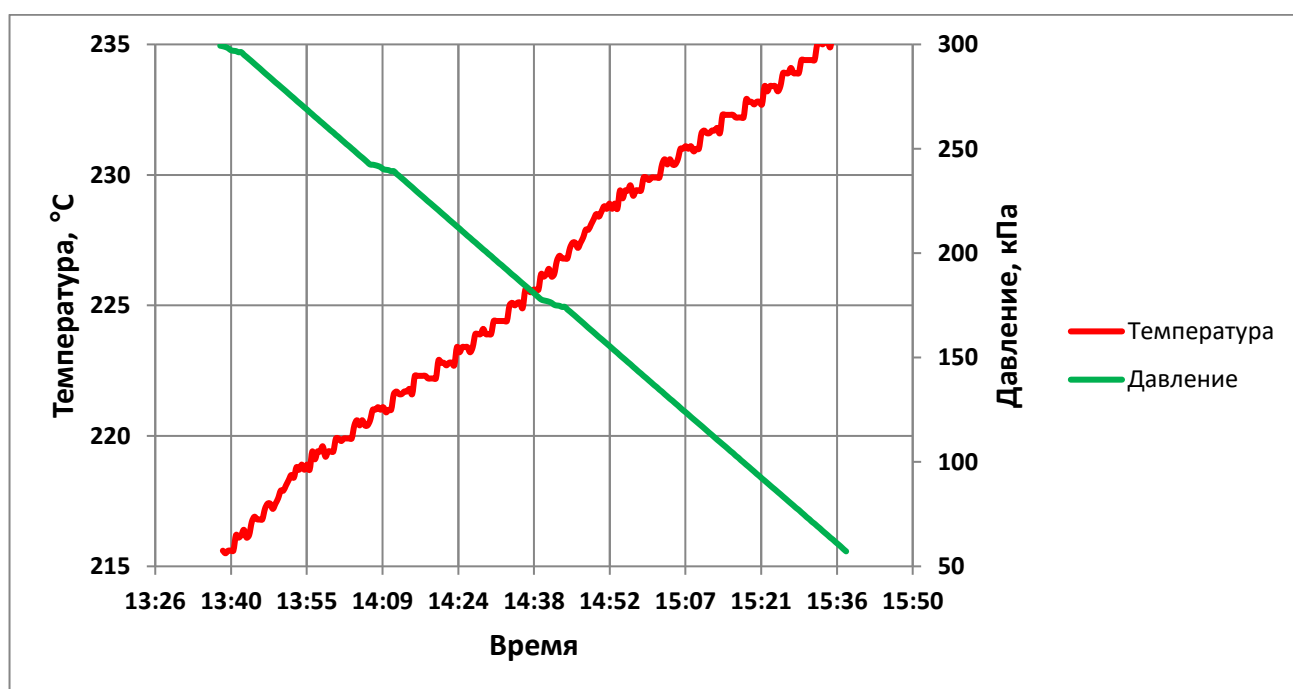


Рисунок 2.4 – Зависимость равновесной температуры протекания реакции в автотермическом режиме от давления, при расходе реагентов 240:60 л/час

Примечание – В данной конструкции реактора температурные датчики установлены на внешней поверхности нагревателя, который в свою очередь, находится снаружи рекуператора, тем самым данные о температуре процесса будут

значительно отличаться в меньшую сторону от остальных конструктивных исполнений, где нагреватель находится в кармане внутри полости с катализатором.

Также, для выявления закономерностей протекания тепловых процессов, уже в ходе испытаний, проведено математическое моделирование в среде ПО Comsol MultiPhysics (<https://www.comsol.ru/>), для этого была построена трехмерная модель реактора и емкости, приведенные на рисунке 2.5.

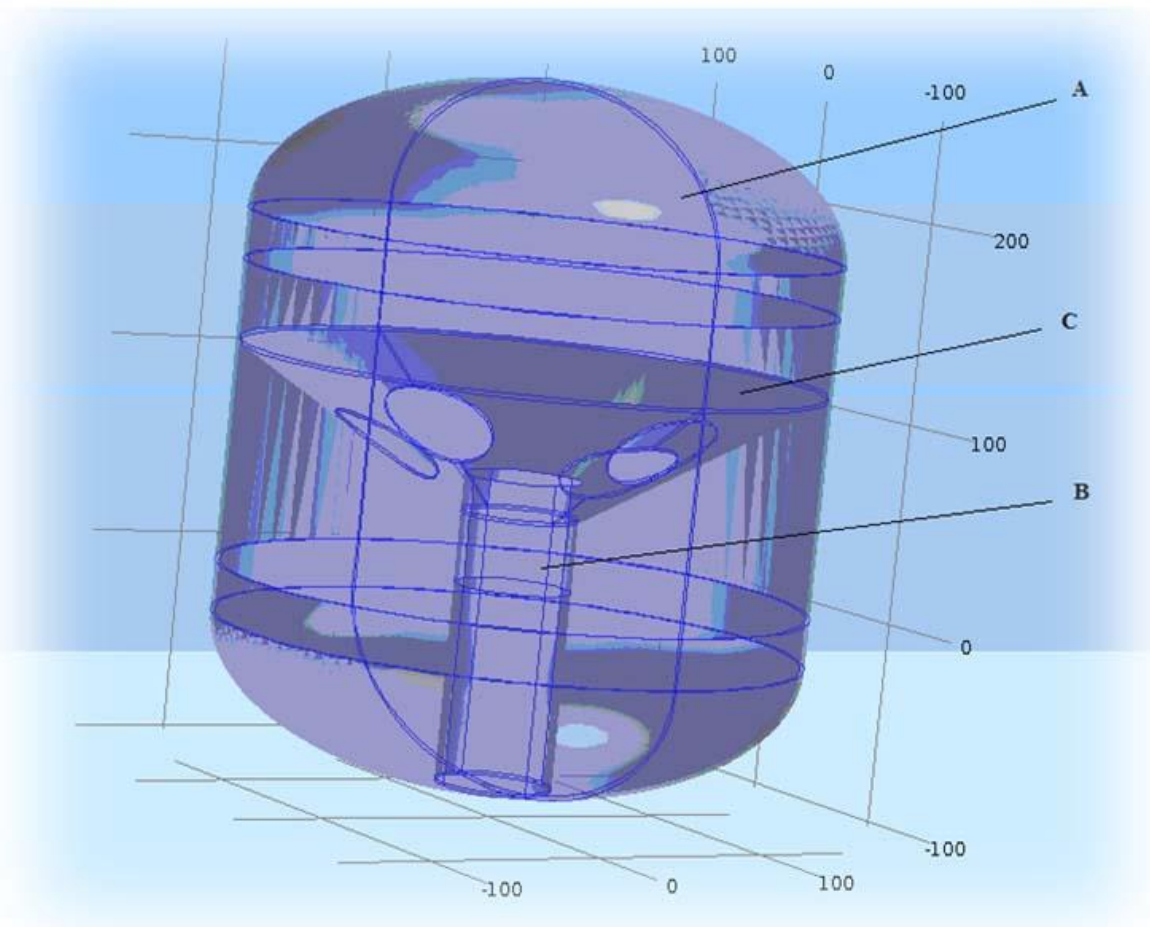


Рисунок 2.5 – Трехмерная модель ЕХДУ

На основе полученных экспериментальных данных создана модель теплоотдачи со стенок реактора со следующими свойствами:

- 1) реактор представлен как три сплошных цилиндра из стали, последовательно соединенных торцами;
- 2) геометрические параметры реактора приведены на рисунке 2.6;
- 3) осесимметричная модель твердого тела, состоящая из 3-х зон:

- V1 – зона реакции с нагревателем;
- V2 – зона реакции без нагревателя;
- V3 – зона теплообмена (теплообменник конденсатор);

4) кондуктивный теплообмен между зонами $k=0,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;

5) конвективный теплообмен с диоксидом углерода, заполняющим емкость, имеющей $t_{\text{int}}=45^\circ\text{C}$, α – меняется от давления, согласно встроенным алгоритмам ПО;

6) радиационный теплообмен с поверхностью емкости, имеющей $t_{\text{amb}}=40^\circ\text{C}$;

7) распределенные по зонам V1 и V2 источники тепла с мощностью соответственно 75% и 25% от тепловыделения реакции Сабатье при данных расходах и полном превращении реагентов (условно считается, что нагреватель отключен, устанавливается режим автотермии);

8) температура на поверхности ЕХДУ постоянная $t_f=40^\circ\text{C}=\text{const}$.

Стационарное решение при перечисленных свойствах определяет распределение температур на поверхности реактора, показанное на рисунке 2.7.

Данное распределение температур с удовлетворительной точностью соответствует экспериментальным данным, полученным на реакторе в процессе экспериментов.

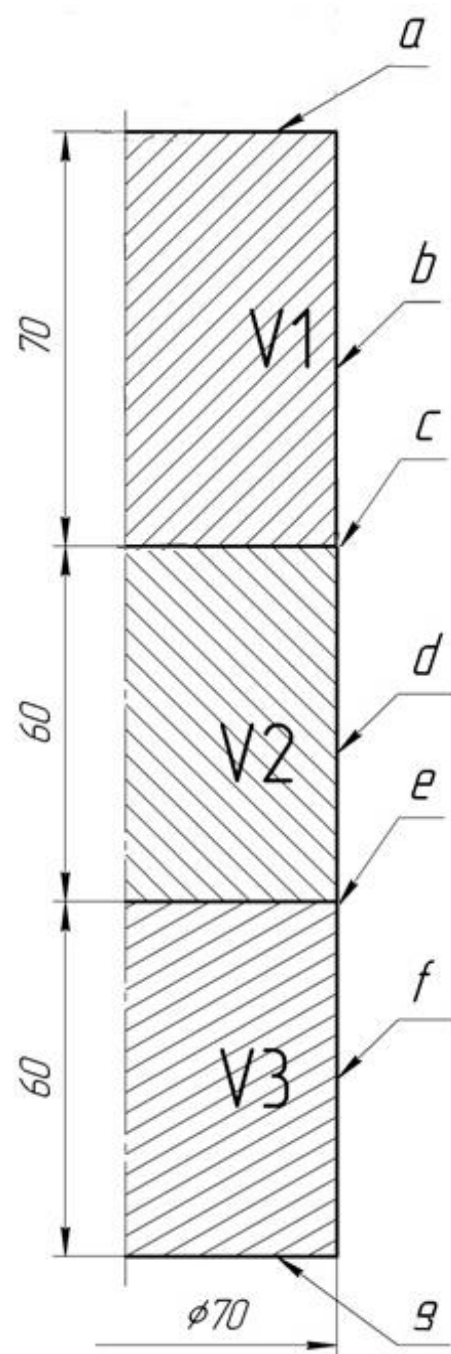


Рисунок 2.6 – Упрощенная модель реактора гидрирования

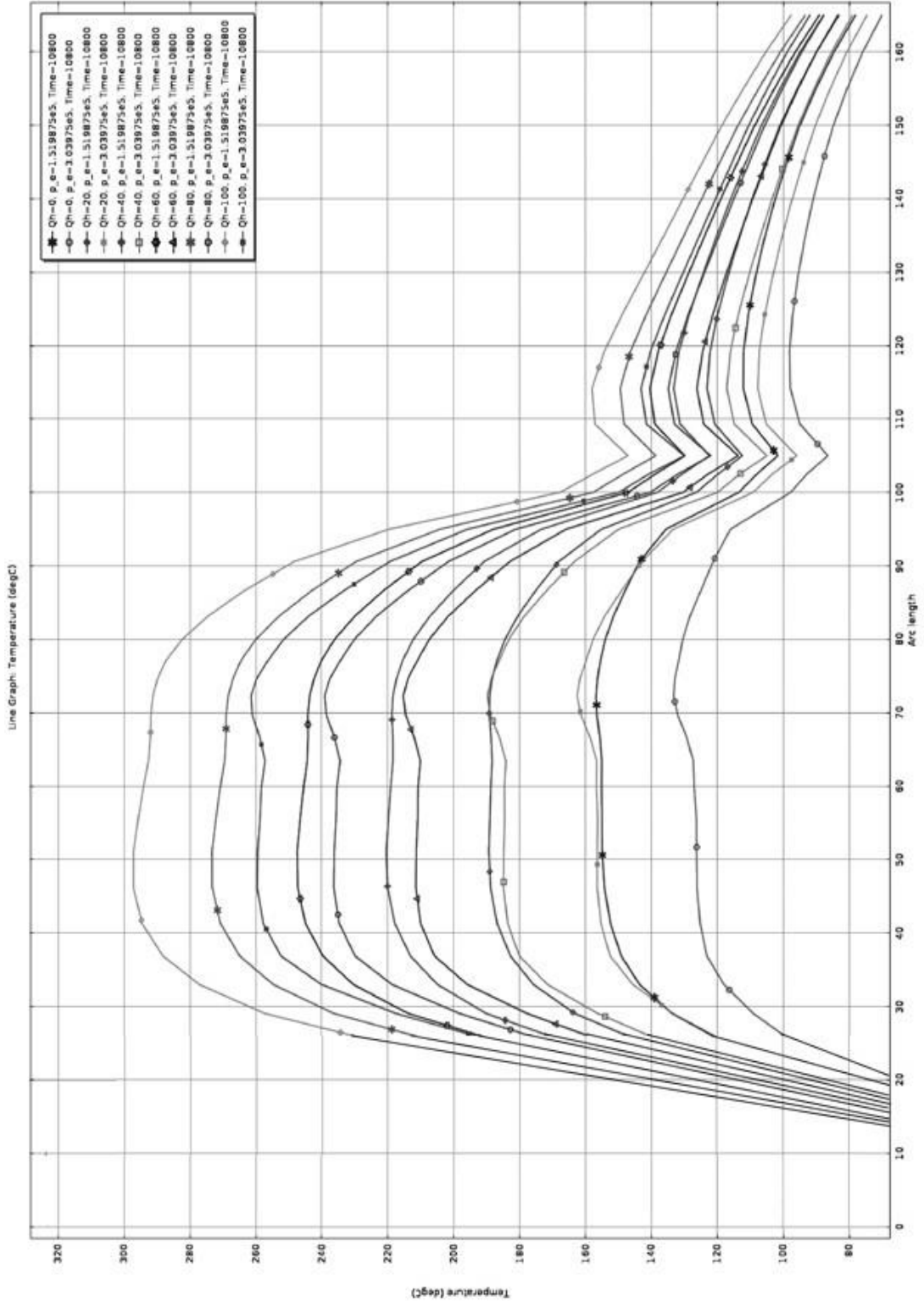


Рисунок 2.7 – Поля температур как результаты моделирования в среде Comsol

Модель имитировала лишь теплообмен корпуса реактора со средой внутри емкости. Тепловыделение было задано и не учитывало течение реакции при этих условиях. Распределение температур показывает, что потери тепла с поверхности слишком велики, и необходима дополнительная теплоизоляция для работы в режиме малых и средних расходов.

Рассматривая значимые факторы в процессе теплообмена, показываемые ПО Comsol в результатах моделирования, тепловой поток, отдаваемый внешней стенкой реактора можно записать в виде [32]:

$$C_p m_{ст} \frac{dT}{d\tau} = Q - k_{осл} \sigma E_{пр} F_{ст} (T_{ст}^4 - T_{co2}^4) - (1 - k_{осл}) \sigma E_{пр} F_{ст} (T_{ст}^4 - T_{об}^4) - k F_{об} (T_{ст} - T_{об}), \quad (2.1)$$

где $m_{ст}$ – масса внешней стенки реактора, кг;

Q – теплота, выделяема в ходе реакции, Вт;

$k_{осл}$ – коэффициент ослабления излучения средой;

$E_{пр}$ – приведенная степень черноты;

T_{co2} – температура газа, К;

$T_{об}$ – температура оболочки, К;

$F_{об}$ – площадь поверхности оболочки, м².

По результатам моделирования стало очевидно, что потери тепла с поверхности реактора слишком велики. Был выполнен расчет теплоизоляции и ее критического диаметра, после чего реактор был теплоизолирован наиболее подходящими материалами: матами из кремнеземного волокна ТМК-2 (длина покрытия от начала слоя 60 мм (вариант Т1), 120 мм (вариант Т2) толщина 4 мм, $\lambda=0,16$ Вт/м·К) (рисунок 2.8). Это снизило потери тепла в окружающую среду, следовательно, увеличило температуру катализатора и производительность, уменьшило зависимость от давления углекислого газа в емкости, привело к расширению границ автотермического режима в сторону низких расходов реагентов.

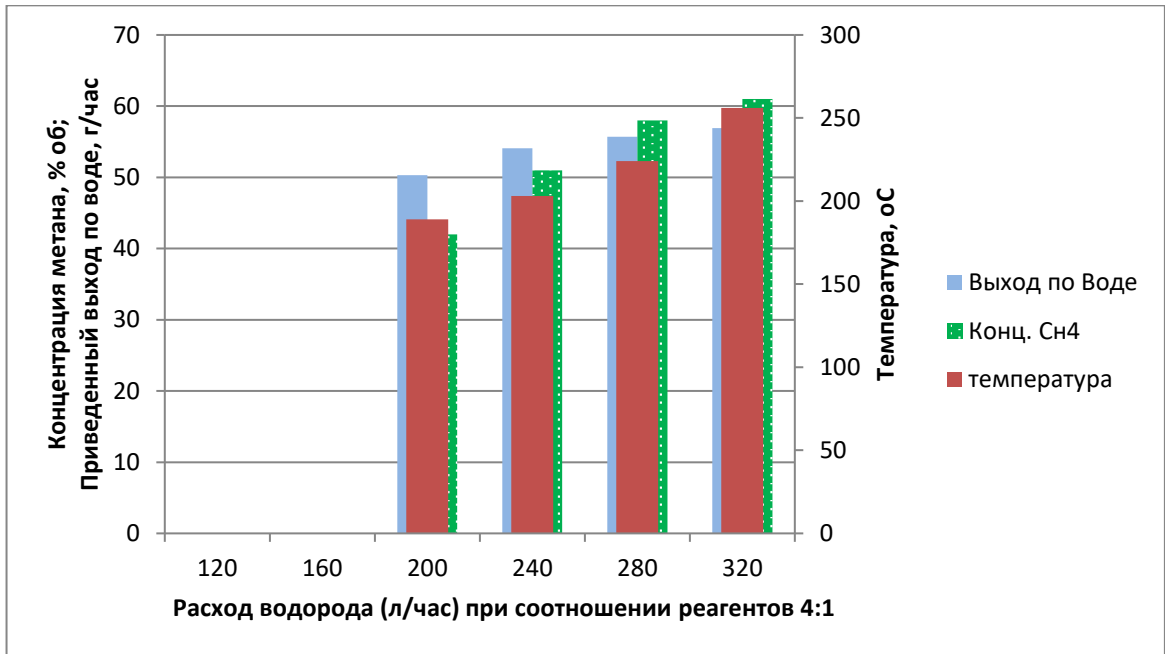


Рисунок 2.9 – Параметры процесса при различных расходах реагентов. Реактор без теплоизоляции, давление поддерживается на уровне 250 кПа. На расходах водорода 120 и 160 л/час автотермия не достигается

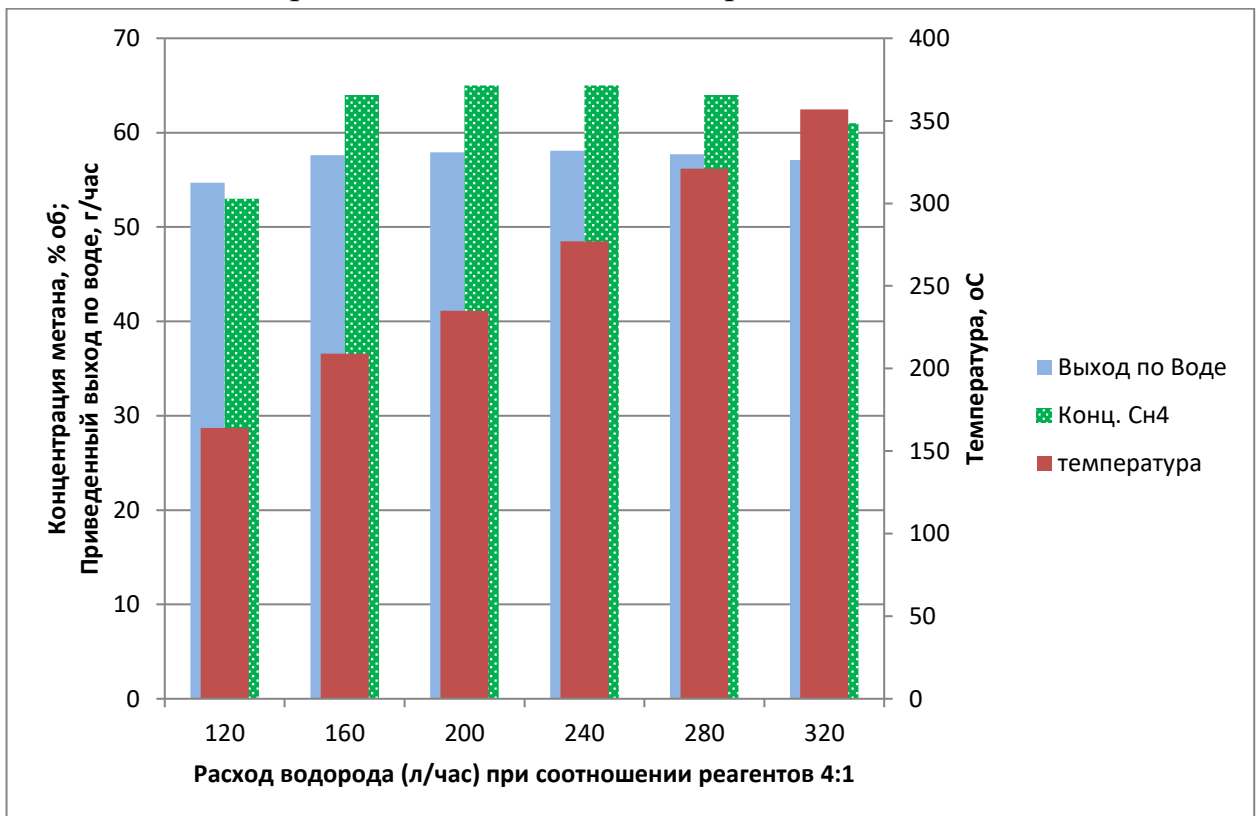


Рисунок 2.10 – Параметры процесса при различных расходах реагентов (на реактор установлена теплоизоляция вариант Т2, давление поддерживается на уровне 250 кПа)

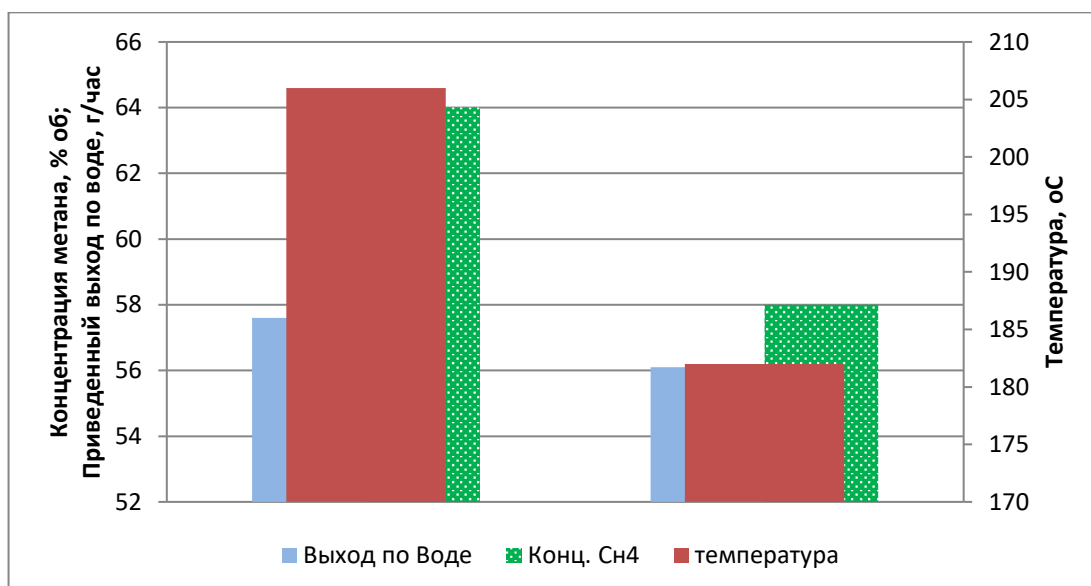


Рисунок 2.11 – Параметры процесса в зависимости от установленной теплоизоляции при остальных равных условиях и расходе 160 л/час. Слева полная теплоизоляция Т2, справа – теплоизоляция верхней части Т1

Далее реактор был извлечен из емкости, и испытания продолжены в условиях свободного теплообмена с воздухом помещения. Расположение вне емкости позволило менять теплоизоляцию во время работы реактора, показателен эксперимент со снятием изоляции, когда за короткий промежуток времени видно затухание реакции, и ее восстановление после повторной установки изоляции (рисунок 2.12).

Варьируя параметры теплоизоляции, было выдвинуто предположение, что происходит изменение поля температур внутри слоя, и это влияет на производительность [37]. Это обусловлено тем, что согласно закономерностям протекания обратимой химической реакции, приведенным в первой главе, максимальная скорость реакции и конверсия большего числа входящих реагентов наблюдается вблизи переднего «горячего» слоя, а наиболее полное превращение достигается в «холодном», при температурах 220-250°C, где равновесие смещается в сторону продуктов, что показано на рисунке 2.13. Как видно на рисунке, максимальная степень превращения достигается при низких температурах, однако со снижением температуры скорость реакции экспоненциально падает, что значительно увеличивает требуемое количество катализатора.

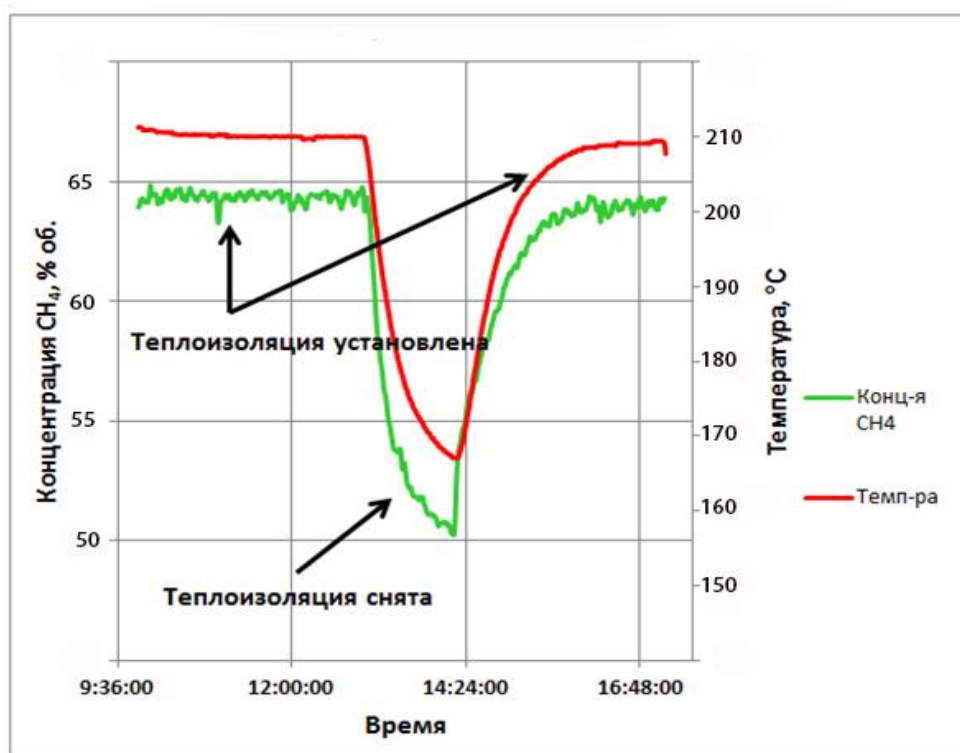


Рисунок 2.12 – Влияние теплоизоляции на ход процесса при расходе водорода и диоксида углерода 160/40 л/час

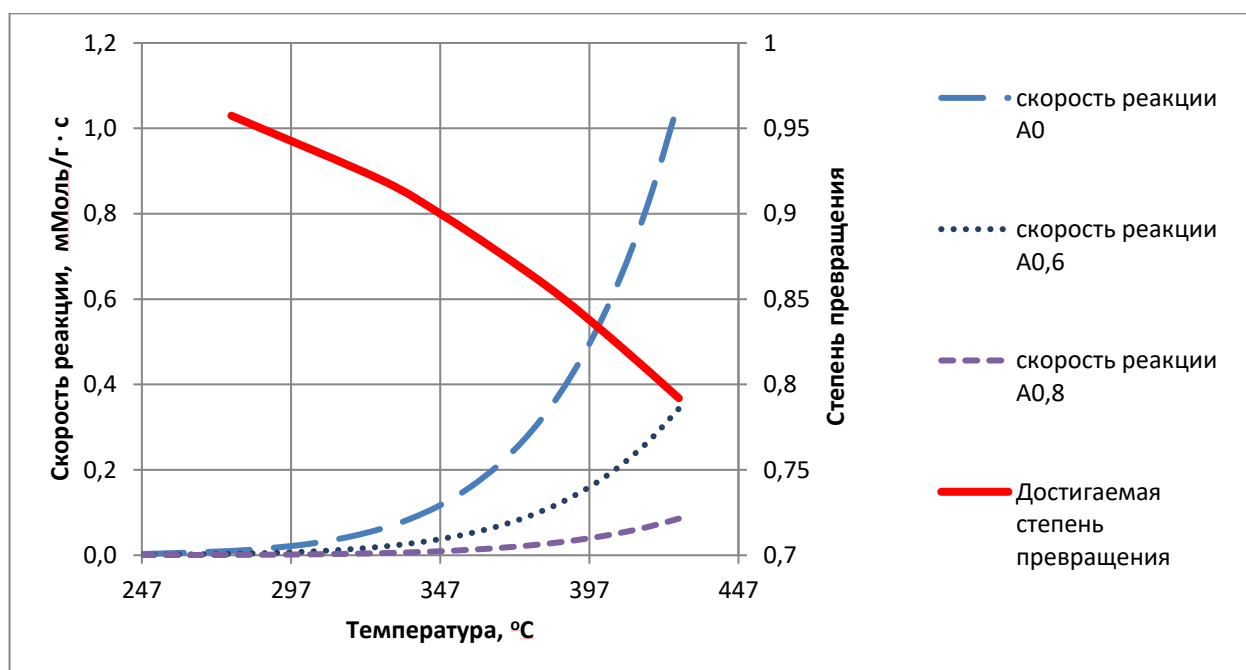


Рисунок 2.13 – Зависимость скорости реакции и равновесной степени превращения от температуры и количества прореагировавших веществ A

Добившись стабильного протекания процесса гидрирования на заданных режимах на рутениевом катализаторе 5P-НС-1, были проведены испытания для

сравнения свойств катализаторов. В реактор поочередно был засыпан рутениевый катализатор 5P-НС-2, а затем никель-хромовый катализатор НХА. В результате оба рутениевых катализатора показали сравнимые результаты с небольшим снижением температуры процесса на 5P-НС-2 без потери производительности, что вероятно обусловлено сохранением активности данного катализатора при более низкой температуре и изменившейся теплопроводности слоя [42]. Катализатор НХА показал несколько лучшие результаты при высоких температурах, но необходимость его активации в высокотемпературном потоке водорода перед использованием делает его применение неоправданным в сравнении с рутениевыми катализаторами. Полученные данные приведены рисунке 2.14.

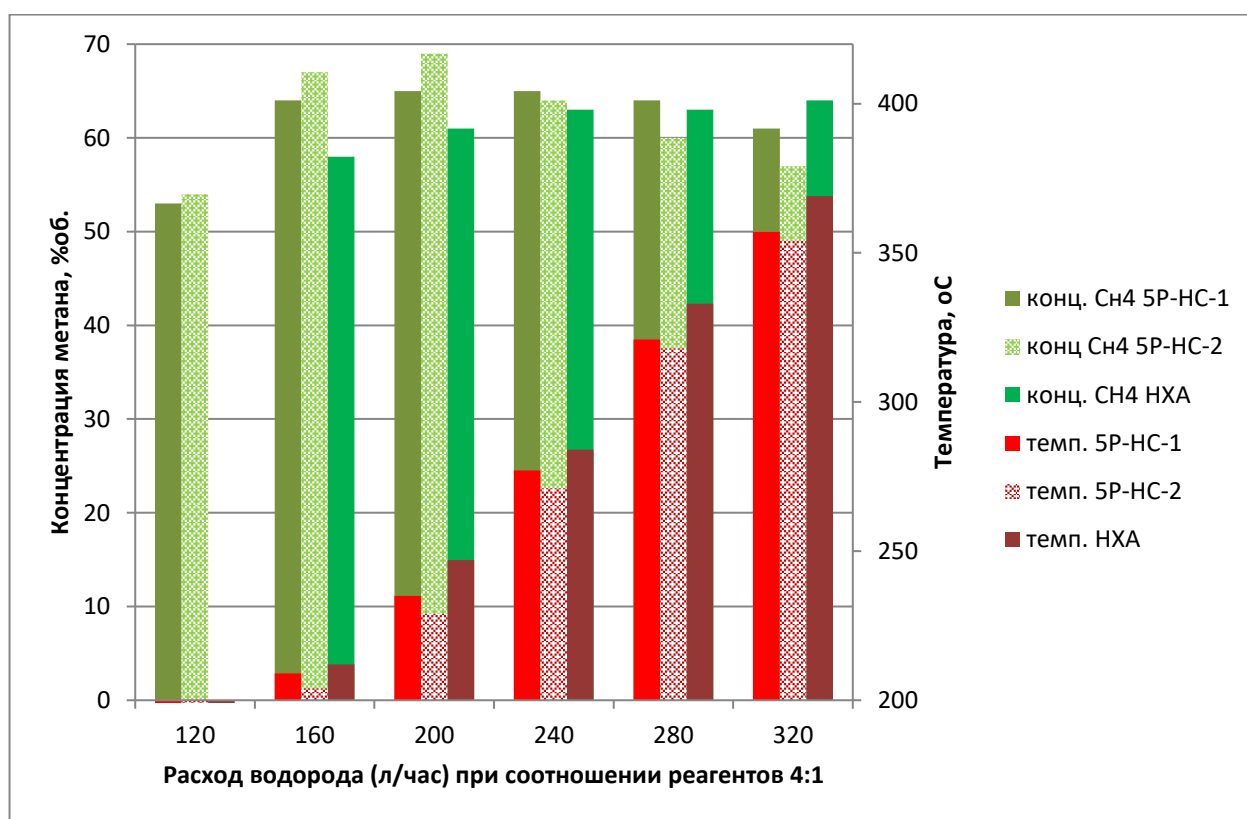


Рисунок 2.14 – Производительность на разных типах катализатора

Далее, после выбора катализатора 5P-НС-1 для дальнейших экспериментов, производились испытания на разных соотношениях входящих газов, чтобы добиться наиболее полной переработки одного из реагентов, в избытке второго, определить максимальную производительность и условия работы на этом режиме (рисунок 2.15). Для режима с избытком углекислого газа поддерживался расход

водорода 160 нл/час, расход диоксида углерода устанавливался согласно соотношению, для режима с избытком водорода расход диоксида углерода был фиксирован – 40 нл/час, а расход H_2 устанавливался согласно выбранному соотношению.

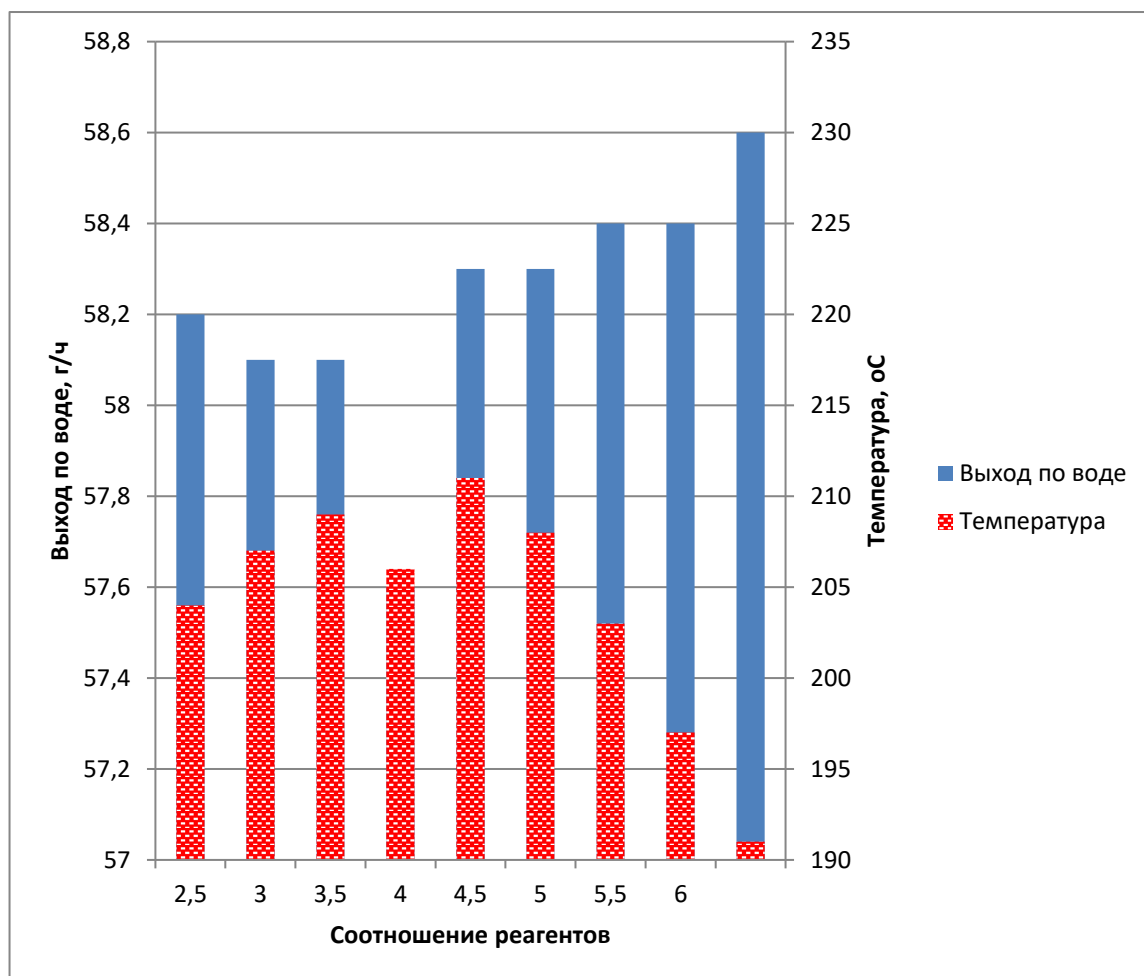


Рисунок 2.15 – Зависимость выхода по воде и температуры протекания реакции от соотношения реагентов

Хорошо заметно, что при небольшом избытке водорода наблюдается максимальная производительность, так как при этих условиях его избытка уже достаточно для смещения равновесия в сторону продуктов, а дальнейшее увеличение количества водорода, в большей мере, приводит лишь к потерям тепла на его прогрев и не участвует в реакции.

Экспериментальная отработка показала многие недостатки конструкции и помогла устранить некоторые из них. Стало ясно, что при выборе конструктивных параметров следует руководствоваться не только отработанными решениями,

полученными на предыдущих этапах, но и проводить анализ протекающих процессов в современном инженерном ПО, позволяющим составить довольно точную физическую модель реактора, тем самым на этапе проектирования выполнить более точный подбор его параметров. Конструкция имеющегося реактора не позволяет в полной мере исследовать закономерности протекания процесса и для продолжения дальнейших исследований требует доработки, этому и будет посвящена следующая глава.

ГЛАВА 3 ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЕАКТОРА ГИДРИРОВАНИЯ

Имитационная модель реактора гидрирования предназначена для получения наиболее полной информации о возможных тепловых режимах его функционирования в условиях автотермического проведения реакции гидрирования с учетом влияния конструктивных параметров реактора, варьирование которых позволяет добиться режима работы блока, близкого к оптимальному:

- объёмные соотношения исходных реагентов CO_2 и H_2 ;
- объёмный расход газовой смеси реагентов;
- геометрические параметры и конструктивное исполнение реакционной зоны, рекуператора, теплоизоляции.

3.1 Формализованное описание реактора гидрирования

В качестве исходной конструкции выбран градиентный реактор гидрирования с односторонним рекуператором [2], расчетная схема которого приведена на рисунке 3.1. Конструкция реактора включает следующие конструктивные элементы:

- тонкопленочный электрический нагреватель – ЭН;
- воздушный зазор в виде гладкого кольцевого канала цилиндрической формы – КГ;
- пористой слой катализатора, размещенный в цилиндрическом кольцевом канале – КП;
- рекуператор, выполненный в виде цилиндрического кольцевого канала с внутренним оребрением – КИР;
- слой теплоизоляции, размещаемый в цилиндрическом кольцевом канале – КИИ;

- кольцевые цилиндрические стенки, непроницаемые для потоков массы – $CT_i (i=1, \dots, 4)$;
- конденсатор водяных паров, являющихся целевым продуктом реакции гидрирования – KT .

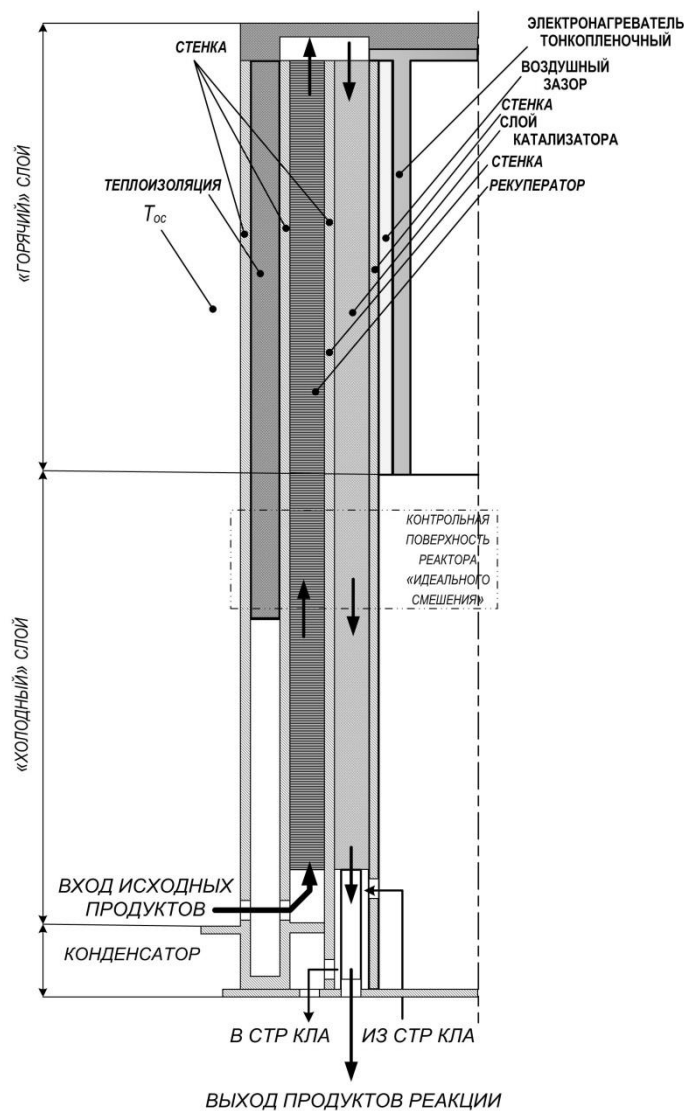


Рисунок 3.1 – Расчетная схема реактора

В общем случае формализованное описание реактора гидрирования должно основываться на постановке сопряженной задачи массо- и теплопереноса при задании на границах раздела сред граничных условий 4-ого рода по «квазиравновесной схеме» [46].

При формировании формализованного описания принята «ячеечная» модель реактора (рисунок 3.2), в которой в каждой из последовательно соединенных ячеек

технологические потоки полностью перемешиваются, а перемешивание между отдельными ячейками отсутствует.



Рисунок 3.2 – Ячеечная модель реактора

Формализованное описание реакционной зоны в i -й ячейке основано на применении нелинейных уравнений материального и энергетического балансов.

В общем виде уравнение материального баланса может быть записано в виде

$$\frac{\partial C_j}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\vec{v}C_j + \sum_{j=1}^4 X_j J), \quad (3.1)$$

где C_j – мольная концентрация j компонента;

\vec{v} – вектор скорости;

X_j – степень превращения j -го компонента;

J – скорость химического процесса;

нижний индекс « j » обозначает соответственно: $j=1$ – CO_2 , $j=2$ – H_2 , $j=3$ – CH_4 , $j=4$ – H_2O .

Переходя для отдельной i -й ячейки к описанию на основе модели идеального перемешивания, система уравнений материального баланса, записанная отдельно для каждого j -го компонента реакционной смеси может быть записана как:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_{\text{CO}_2}}{d\tau} &= \frac{Q_{\text{CO}_2}}{\epsilon V_{i,\text{CO}_2}} (C'_{\text{CO}_2} - C''_{\text{CO}_2}) \\ \frac{dC_{\text{H}_2}}{d\tau} &= \frac{Q_{\text{H}_2}}{\epsilon V_{i,\text{H}_2}} (C'_{\text{H}_2} - C''_{\text{H}_2}) \\ \frac{dC_{\text{CH}_4}}{d\tau} &= \frac{Q_{\text{CH}_4}}{\epsilon V_{i,\text{CH}_4}} (C'_{\text{CH}_4} - C''_{\text{CH}_4}) \\ \frac{dC_{\text{H}_2\text{O}}}{d\tau} &= \frac{Q_{\text{H}_2\text{O}}}{\epsilon V_{i,\text{H}_2\text{O}}} (C'_{\text{H}_2\text{O}} - C''_{\text{H}_2\text{O}}) \end{aligned} \right\}, \quad (3.2)$$

где $Q_{CO_2}, Q_{H_2}, Q_{CH_4}, Q_{H_2O}$ – объемные расходы компонентов реакционной смеси;

V_i – геометрический объем слоя катализатора ($V_i = L_i S_k$);

ϵ – пористость слоя катализатора;

верхние индексы «'» и «''» обозначают значения мольных концентраций реакционной смеси на входе в реакционную зону и выходе из нее, соответственно.

Для определения объемных расходов реакционной смеси необходимо определить скорость течения реакционной смеси в слое катализатора. Учитывая, что реактор предназначен для переработки малых расходов исходных компонентов в пористой среде катализатора, для определения скорости течения в реакционной зоне может быть применен линейный закон Дарси в форме:

$$v = \frac{-k}{\mu} \frac{dP}{dl}, \quad (3.3)$$

где k – проницаемость слоя катализатора, m^2 ;

μ – динамическая вязкость, Па·сек;

l – длина слоя, м;

P – давление на входе в отдельную ячейку, Па.

Гранулы катализатора имеют сферическую форму, поэтому для определения проницаемости k принята зависимость [46]:

$$k = \frac{\epsilon^3 \cdot d_s^2}{180(1-\epsilon)^2}, \quad (3.4)$$

где d_s – диаметр гранулы катализатора.

При условиях реакции гидрирования свойства газовой смеси в реакционной зоне могут быть приняты как свойства смеси идеальных газ, поэтому для вычисления динамической вязкости газовой смеси оправданно использовать метод Саттерленда, в соответствие с которым:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{см} &= \frac{\sum_{j=1}^{j=4} (\mu_j n_j \sqrt{M_{\mu j}})}{(n_j \sqrt{M_{\mu j}})} \\ \mu_j(T) &= \mu_j(T_0) \sqrt{\frac{T}{T_0}} \end{aligned} \right\}, \quad (3.5)$$

где $\mu_j, \mu_{см}$ – динамическая вязкость j -го компонента и смеси соответственно;

n_j – число молей j -го компонента;

$M_{\mu j}$ – молекулярная масса j -го компонента;

T_0 – начальная температура для измерения влажности.

Учитывая, что $(C_j' - C_j'') = \Delta C_j = X_j J$, для получения замкнутого описания уравнения материального баланса необходимо ввести расчетные зависимости, определяющие скорость протекания реакции J и степень превращения X_j .

Вид кинетического уравнения для определения скорости химической реакции зависит от применяемого катализатора. Для рутениевого катализатора по данным работы [34]:

$$J = k_r P_{i,CO_2}^{0,2} P_{i,H_2}^{0,8} \left(1 - \frac{P_{i,CH_4} P_{i,H_2O}^2}{K_r P_{i,CO_2} P_{i,H_2}^4} \right), \quad (3.6)$$

где P_{i,CO_2} , P_{i,H_2} , P_{i,CH_4} и P_{i,H_2O} – парциальные давления исходных веществ и продуктов реакции, соответственно;

k_r , K_r – константы скорости реакции и химического равновесия.

При этом константа скорости реакции k_r , определяется из эмпирической зависимости:

$$k_r = 4,26 \times 10^5 \exp(-12000/T\tilde{R}), \quad (3.7)$$

где T – абсолютная температура;

\tilde{R} – универсальная газовая постоянная.

Константа равновесия K_r в соответствии с работой [40] может быть определена из выражения:

$$K_1 = \exp \left[\frac{\lambda_1}{T^2} + \frac{\lambda_2}{T} + \lambda_3 \right], \quad (3.8)$$

где $\lambda_1 = -730726,0$, $\lambda_2 = 24125,3$, $\lambda_3 = -26,9616$.

Степень превращения X_j может быть определена из зависимости:

$$X_j = \frac{n_j' - n_j''}{n_j'}. \quad (3.9)$$

При составлении уравнения энергетического баланса для каждой i -й ячейки приняты следующие основные допущения:

- смесь исходных компонентов и продуктов реакции подчиняется законам идеальных газов;
- теплофизические параметры смеси являются функциями температуры и химического состава;
- разделяющие металлические стенки рассматриваются как «тонкие».

При данных допущениях уравнения энергетического баланса для выделенных конструктивных элементов (рисунок 3.1) в i -й ячейке могут быть записаны в виде:

- для элемента ЭН – тонкопленочного электрического нагревателя:

$$\frac{dT_{i,\text{ЭН}}}{dt} = \left\{ q_{i,\text{ЭН}} - \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_{i,\text{ЭН}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,\text{СТ1}}}{100} \right)^4 \right] \right\} A_1^{\text{ЭН}} - \frac{\lambda_{i,\text{КГ}}}{\delta_{i,\text{КГ}}} A_1^{\text{СТ1}} (T_{i,\text{ЭН}} - T_{i,\text{СТ1}}), \quad (3.10)$$

$$\text{где } A_1^{\text{ЭН}} = \frac{\pi L_i D_{\text{ЭН}}}{(c_{\text{ЭН}} \rho_{\text{прЭН}} V_{\text{ЭН}})_i}; \quad A_1^{\text{СТ1}} = \frac{\pi L_i D_{\text{СТ1}}}{(c_{\text{СТ1}} \rho_{\text{СТ1}} V_{\text{СТ1}})_i};$$

$q_{i,\text{ЭН}}$ – тепловой поток от электронагревателя в i -й ячейке [Дж/с·м²];

ε и c_0 – степень черноты и постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·К⁴;

$\frac{\lambda_{i,\text{КГ}}}{\delta_{i,\text{КГ}}}$ – термическая проводимость зазора, отделяющего нагреватель от стенки

(КГ – канал газовый), Вт/м²·К;

L_i – длина i -й ячейки; одинакова для всех элементов, м;

$V_{\text{ЭН}}, D_{\text{ЭН}}, c_{\text{ЭН}}$ и $\rho_{\text{прЭН}}$ – объем (м³); диаметр (м); теплоемкость (Дж/кг·К) и приведенная плотность материала (кг/м³) электронагревателя соответственно;

$V_{\text{СТ1}}, D_{\text{СТ1}}, c_{\text{СТ1}}$ и $\rho_{\text{СТ1}}$ – объем (м³); диаметр (м); теплоемкость (Дж/кг·К) и плотность материала (кг/м³) стенки СТ1;

- для стенки СТ1, отделяющей катализатор от нагревателя:

$$\frac{dT_{i,\text{СТ1}}}{dt} = \frac{\lambda_{i,\text{КГ}}}{\delta_{i,\text{КГ}}} A_1^{\text{СТ1}} (T_{i,\text{ЭН}} - T_{i,\text{СТ1}}) + \varepsilon c_0 A_1^{\text{ЭН}} \left[\left(\frac{T_{i,\text{ЭН}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,\text{СТ1}}}{100} \right)^4 \right] - A_1^{\text{КП}} (T_{i,\text{СТ1}} - T_{i,\text{КП}}), \quad (3.11)$$

$$\text{где } A_1^{\text{КП}} = \frac{\lambda_{i,\text{СТ1}}}{(\varepsilon \rho_{\text{КП}} c_{p,\text{КП}} V_{\text{КП}})_i \delta_{i,\text{СТ1}}} S_{i,\text{СТ1}};$$

$\frac{\lambda_{i,\text{СТ1}}}{\delta_{i,\text{СТ1}}}$ – термическая проводимость стенки СТ1, Вт/м²·К;

$S_{i,\text{СТ1}}$ – площадь стенки СТ1, м²;

$V_{\text{КП}}$ и $\rho_{\text{КП}}$ – объем газа в слое катализатора, м³;

$\rho_{\text{КП}}$ – плотность газа в слое катализатора, кг/м³;

$C_{pi,\text{КП}}$ – теплоемкость газовой смеси в выделенной зоне слоя катализатора, (Дж/кг·К);

– для элемента КП – слоя катализатора:

$$\frac{dT_{i,\text{КП}}}{d\tau} = A_1^{\text{КП}}(T_{i,\text{СТ1}} - T_{i,\text{КП}}) + A_r^{\text{КП}}(\sum_{j=1}^4 X_j) - A_2^{\text{КП}}(T_{i,\text{КП}} - T_{i,\text{КПР}}) - \rho_{i,\text{КП}}C_{pi,\text{КП}}Q_{i,\text{КП}}(T'_{i,\text{КП}} - T''_{i,\text{КП}}), \quad (3.12)$$

$$\text{где } A_r^{\text{КП}} = \frac{J\tilde{H}_r}{(\epsilon\rho_{\text{КП}}C_{p,\text{КП}} + (1-\epsilon)C_{\text{КАТ}}\rho_{\text{КАТ}})_i V_{i,\text{КП}}}; \quad A_2^{\text{КП}} = \frac{k_{i,\text{СТ2}}}{(\epsilon\rho_{\text{КП}}C_{p,\text{КП}}V_{\text{КП}})_i} S_{i,\text{СТ2}};$$

\tilde{H}_r – тепловой эффект реакции, Дж/моль;

$$k_{i,\text{СТ2}} = \frac{1}{\frac{\delta_{i,\text{СТ2}}}{\lambda_{i,\text{СТ2}}} + \frac{1}{\alpha_{i,\text{КПР}}\eta_o\psi}} - \text{коэффициент теплопередачи, Вт/м}^2\cdot\text{К};$$

$C_{\text{КАТ}}$ – теплоемкость слоя катализатора, Дж/кг·К;

$\rho_{\text{КАТ}}$ – плотность слоя катализатора, кг/м³;

$S_{i,\text{СТ2}}$ – площадь стенки СТ2, м²;

$\frac{\lambda_{i,\text{СТ2}}}{\delta_{i,\text{СТ2}}}$ – термическая проводимость стенки СТ2, Вт/м²·К;

$\alpha_{i,\text{КПР}}$ – коэффициент теплоотдачи в рекуператоре, Вт/м²·К;

η_o, ψ – коэффициент эффективности оребрения и коэффициент оребрения соответственно;

$Q_{i,\text{КП}}$ – объемный расход исходных компонентов реакционной смеси, м³/с;

$T'_{i,\text{КП}}, T''_{i,\text{КП}}$ – температура реакционной смеси на входе и выходе из реакционной ячейки соответственно, К;

– для элемента КПР – рекуперативного теплообменника:

$$\frac{dT_{i,\text{КПР}}}{d\tau} = A_2^{\text{КПР}}(T_{i,\text{КП}} - T_{i,\text{КПР}}) + \rho_{i,\text{КПР}}C_{pi,\text{КПР}}Q_{i,\text{КПР}}(T''_{i,\text{КПР}} - T'_{i,\text{КПР}}) - A_1^{\text{КПР}}(T_{i,\text{КПР}} - T_{i,\text{СТ3}}), \quad (3.13)$$

$$\text{где } A_1^{\text{КПР}} = \frac{k_{i,\text{СТ3}}}{(\rho_{\text{КПР}}C_{p,\text{КПР}}V_{\text{КПР}})_i} S_{i,\text{СТ3}};$$

$$k_{i,\text{СТ3}} = \frac{1}{\frac{\delta_{i,\text{СТ3}}}{\lambda_{i,\text{СТ3}}} + \frac{1}{\alpha_{i,\text{КПР}}\eta_o\psi}} - \text{коэффициент теплопередачи рекуператора, Вт/м}^2\cdot\text{К};$$

$C_{pi,\text{КПР}}$ – теплоемкость газа в зоне рекуператора, Дж/кг·К;

$\rho_{i,\text{КПР}}$ – плотность газа в зоне рекуператора, кг/м³;

$Q_{i,КПР}$ – объемный расход газа в зоне рекуператора, м³/с;

$T''_{i,КПР}, T'_{i,КПР}$ – значения температур на выходе и входе соответствующей ячейки рекуператора, К;

$S_{i,СТЗ}$ – площадь стенки СТЗ, м²;

$\frac{\lambda_{i,СТЗ}}{\delta_{i,СТЗ}}$ – термическая проводимость стенки СТЗ, Вт/м²·К;

– для элемента СТЗ, отделяющей слой теплоизоляции от рекуператора:

$$\frac{dT_{i,СТЗ}}{d\tau} = A_1^{КПР} (T_{i,КПР} - T_{i,СТЗ}) - A_1^{СТ4} (T_{i,СТЗ} - T_{i,СТ4}), \quad (3.14)$$

где $A_1^{СТ4} = \frac{\lambda_{i,ТПИ}}{(c_{СТ4}\rho_{СТ4}V_{СТ4})_i\delta_{i,ТПИ}} S_{i,СТ4}$;

$\frac{\lambda_{i,ТПИ}}{\delta_{i,ТПИ}}$ – термическая проводимость слоя теплоизоляции, Вт/м²·К;

$S_{i,СТ4}$ – площадь стенки СТ4, м²;

$V_{СТ4}, c_{СТ4}$ и $\rho_{СТ4}$ – объем (м³), теплоемкость (Дж/кг·К) и плотность (кг/м³) материала стенки СТ4;

– для элемента СТ4, отделяющей слой теплоизоляции от внешней газовой среды:

$$\frac{dT_{i,СТ4}}{d\tau} = A_1^{СТ4} (T_{i,СТЗ} - T_{i,СТ4}) - A_2^{СТ4} (T_{i,СТ4} - T_{i,Г.СР}), \quad (3.15)$$

где $A_2^{СТ4} = \frac{\alpha_{Г.СР}}{(c_{СТ4}\rho_{СТ4}V_{СТ4})_i} S_{i,СТ4}$;

$\alpha_{Г.СР}$ – коэффициент теплоотдачи окружающей газовой среды, Вт/м²·К.

Переходя к записи введенных уравнений в отклонениях получим:

$$\left. \begin{aligned} T_{i,ЭН}(\tau) &= T_{i,ЭН}(\tau - \Delta\tau) + \left\{ A_1^{ЭН} \left((q_{i-1,ЭН} - \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_{i,ЭН}(\tau - \Delta\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,СТ1}(\tau - \Delta\tau)}{100} \right)^4 \right] \right) - \right. \\ &\left. - A_1^{СТ1} \frac{\lambda_{i,КГ}}{\delta_{i,КГ}} (T_{i-1,ЭН}(\tau - \Delta\tau) - T_{i-1,СТ1}(\tau - \Delta\tau)) \right\} \Delta\tau; \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} T_{i,СТ1}(\tau) &= T_{i,СТ1}(\tau - \Delta\tau) + \left\{ \frac{\lambda_{i,КГ}}{\delta_{i,КГ}} A_1^{СТ1} (T_{i-1,ЭН}(\tau - \Delta\tau) - T_{i-1,СТ1}(\tau - \Delta\tau)) + \right. \\ &\left. + \varepsilon c_0 A_1^{ЭН} \left[\left(\frac{T_{i,ЭН}(\tau - \Delta\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,СТ1}(\tau - \Delta\tau)}{100} \right)^4 \right] - A_1^{КПР} (T_{i,СТ1}(\tau - \Delta\tau) - T_{i,КПР}(\tau - \Delta\tau)) \right\} \Delta\tau; \end{aligned}$$

$$T_{i,КПР}(\tau) = T_{i,КПР}(\tau - \Delta\tau) + \left\{ A_1^{КПР} (T_{i,СТ1}(\tau - \Delta\tau) - T_{i,КПР}(\tau - \Delta\tau)) + A_r^{КПР} (\sum_{j=1}^4 X_j) - \right.$$

$$-A_2^{\text{KП}} \left(T_{i,\text{KП}}(\tau - \Delta\tau) - T_{i,\text{KПР}}(\tau - \Delta\tau) \right) - \rho_{i,\text{KП}} C_{pi,\text{KП}} Q_{i,\text{KП}} \left(T'_{i,\text{KП}}(\tau - \Delta\tau) - T''_{i,\text{KП}}(\tau - \Delta\tau) \right) \} \Delta\tau \quad (3.16)$$

$$T_{i,\text{KПР}}(\tau) = T_{i,\text{KПР}}(\tau - \Delta\tau) + \left\{ A_2^{\text{KП}} \left(T_{i,\text{KП}}(\tau - \Delta\tau) - T_{i,\text{KПР}}(\tau - \Delta\tau) \right) + \rho_{i,\text{KПР}} C_{pi,\text{KПР}} Q_{i,\text{KПР}} \left(T''_{i,\text{KПР}}(\tau - \Delta\tau) - T'_{i,\text{KПР}}(\tau - \Delta\tau) \right) - A_1^{\text{KПР}} \left(T_{i,\text{KПР}}(\tau - \Delta\tau) - T_{i,\text{CT3}}(\tau - \Delta\tau) \right) \right\} \Delta\tau$$

$$T_{i,\text{CT3}}(\tau) = T_{i,\text{CT3}}(\tau - \Delta\tau) + \left\{ A_1^{\text{KПР}} \left(T_{i,\text{KПР}}(\tau - \Delta\tau) - T_{i,\text{CT3}}(\tau - \Delta\tau) \right) - A_1^{\text{CT4}} \left(T_{i,\text{CT3}}(\tau - \Delta\tau) - T_{i,\text{CT4}}(\tau - \Delta\tau) \right) \right\} \Delta\tau$$

$$T_{i,\text{CT4}}(\tau) = T_{i,\text{CT4}}(\tau - \Delta\tau) + \left\{ A_1^{\text{CT4}} \left(T_{i,\text{CT3}}(\tau - \Delta\tau) - T_{i,\text{CT4}}(\tau - \Delta\tau) \right) - A_2^{\text{CT4}} \left(T_{i,\text{CT4}}(\tau - \Delta\tau) - T_{i,\text{г.ср}}(\tau - \Delta\tau) \right) \right\} \Delta\tau$$

Реакция Сабатье может иметь очень большую скорость при высоких значениях температуры в зоне реакции. В зависимости от значений скорости химической реакции и процессов переноса вещества можно выделить три лимитирующие стадии протекания реакции, определяемые различными кинетическими уравнениями:

- зону внутренней диффузии;
- зону внешней диффузии;
- кинетическую область.

Для определения влияния на скорость реакции внутренней диффузии в порах гранулы катализатора был применен критерий Вейса-Пратера [2], показывающий, что условием наличия внутридиффузионного торможения является неравенство:

$$\frac{r_{\text{гр}}W}{D_i C_i} > 1, \quad (3.17)$$

где $r_{\text{гр}}$ – радиус гранулы катализатора;

D_i – эффективный коэффициент диффузии гранулы катализатора;

C_i – концентрация компонента, диффузия которого рассматривается;

W – наблюдаемая скорость реакции на единицу объема катализатора.

Учитывая способ получения используемого катализатора марки 5P-НС, в качестве $r_{\text{гр}}$ принимают не радиус гранулы, а толщину каталитически активного слоя на поверхности гранулы и скорость реакции должна относиться, также, к единице объема каталитически активной части гранулы. Исходя из отчетов производителя катализатора НПП «Кристалл» [42] размеры гранул и глубина нанесения активного вещества – рутения – исключает переход процесса в область внутридиффузионного торможения во всех допустимых режимах работы реактора.

Для определения возможности возникновения внешнедиффузионного торможения рассчитаны скорости массопередачи реагентов и продуктов реакции:

$$W_{id} = \beta(C_{in} - C_{i0}). \quad (3.18)$$

Скорость диффузионного массопереноса W_{id} каждого из компонентов определяется коэффициентом массоотдачи и разницей концентраций компонента в ядре потока C_{in} и на поверхности гранулы C_{i0} . При этом принято допущение, что, в

случае перехода в режим диффузионного торможения, концентрации компонентов на поверхности гранулы катализатора равны равновесным концентрациям при данной температуре, а температура гранулы все еще близка к температуре потока. Коэффициент массоотдачи определяется через число Нуссельта, коэффициент диффузии и толщину пограничного слоя вблизи гранулы:

$$\beta = \frac{Nu D}{\delta}, \quad (3.19)$$

где β – коэффициент массоотдачи;

D – коэффициент диффузии;

δ – толщина пограничного слоя.

В соответствии со стехиометрическими коэффициентами реакции гидрирования определяющей скоростью в случае наступления режима внешедиффузионного торможения является диффузия того вещества, которому соответствует минимум скорости диффузионного переноса, отнесенный к соответствующему стехиометрическому коэффициенту

$$\min \left\{ \frac{W_{H_2d}}{4}; W_{CO_2d}; W_{CH_4d}; \frac{W_{H_2Od}}{2} \right\}.$$

Проведены расчеты соответствующих скоростей для характерных условий работы реактора: $523 < T < 773^\circ K$; $\alpha=4$, $A=0$, где A – доля прореагировавших компонентов (рисунок 3.3).

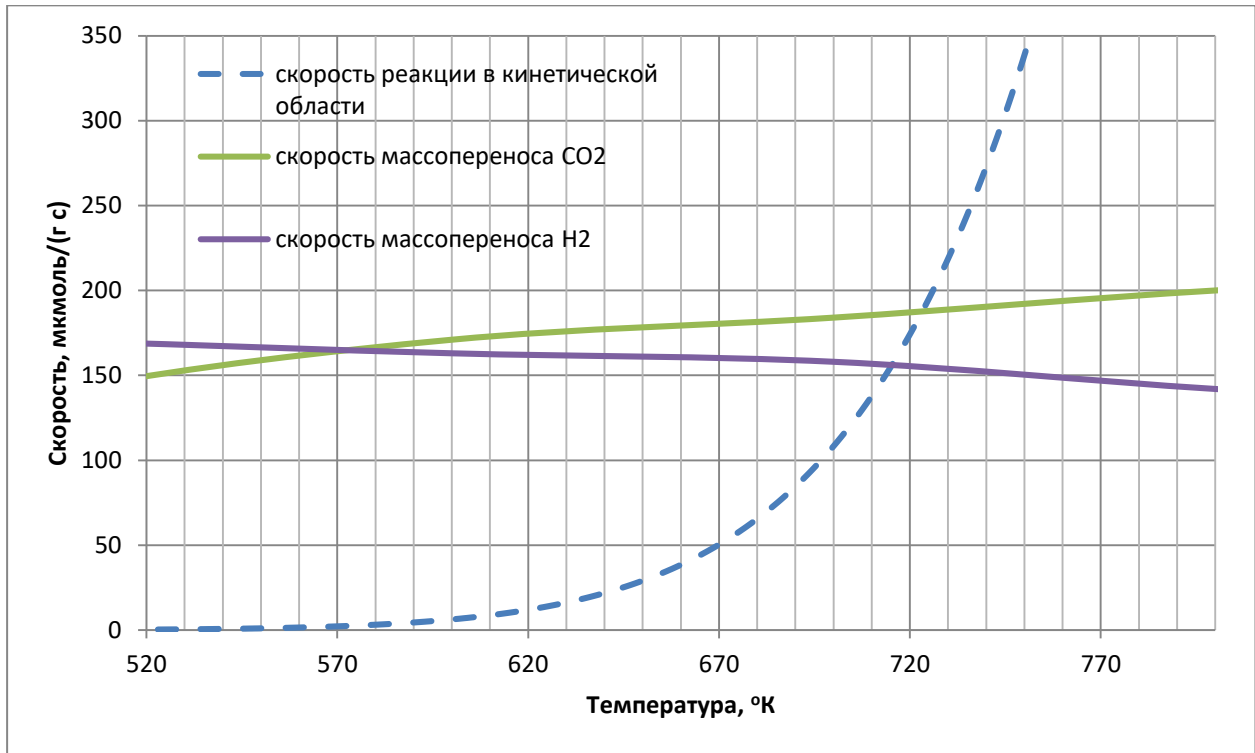


Рисунок 3.3 – Характеристики массопереноса

Как видно на графике, реакция переходит в режим внешнедиффузионного торможения только при температуре более 710°К (437°С), что выше определенных ранее оптимальных условий проведения процесса. Скорости массопереноса подвержены намного меньшему влиянию от температуры, соотношения исходных веществ и наличия продуктов реакции, нежели кривая скорости реакции, следовательно, можно рассматривать исключительно кинетическую область течения процесса, скорость которого определяется согласно уравнению (3.6).

3.2 Программная реализация

При программной реализации имитационной модели блока гидрирования и входящих в него элементов большое значение имеет выбор среды программирования, которая должна обладать не только мощным математическим ядром, но и иметь широкие возможности графического представления полученной информации для удобства ее анализа оператором. Также предполагается интеграция модели БГДУ в уже имеющуюся модель АПКОЭС, имитирующую

гермообъем обитаемого космического аппарата, что во многом определило выбор комплекса ПО National Instruments LabView в качестве используемой среды программирования [24, 25].

LabView – среда инженерного графического программирования, отличительной особенностью которой является то, что она основана на графическом представлении всех элементов алгоритма, а также изначально предназначена для создания комплексных решений задач измерения, управления и автоматизации научного эксперимента и тестирования оборудования.

Разработка в среде LabView кардинально отличается от написания кода программ в традиционных алгоритмических языках программирования, таких как C++ и подобных, основанных на вводе текстовых команд, последовательно образующих программный код. В LabView используется язык, так называемого, графического программирования, в которой алгоритм составляется в графической форме пиктограмм, обозначающих каждый стандартный элемент, в совокупности образующие блок-схему. Это позволяет облегчить ввод алгоритма и его последующую отладку, так как исключает синтаксические детали языка программирования [29].

Основным принципом компиляции в LabView является принцип потока данных, по которому функции выполняются лишь тогда, когда они получают входные данные, что однозначно определяет порядок выполнения алгоритма.

Также реализовано событийно-управляемое программирование, которое значительно упрощает моделирование событий, возникающих при функционировании систем. Отдельные подпрограммы, разрабатываемые в среде LabView, называются виртуальными приборами. Виртуальный прибор (VI или ВП) состоит из двух основных частей:

- интерактивный пользовательский интерфейс, доступный при работе программы на Лицевой Панели (Front Panel);
- исполняемая часть приложения (Блок-диаграмма), представляющая из себя набор пиктограмм операторов, связанных логическими действиями, в совокупности составляющими «код программы».

Частью кода могут быть константы, структуры управления выполнением и ввода данных, встроенные функции, ВП более низкого уровня. Объекты интерфейса представлены в блок-диаграмме в виде соответствующих терминалов, через которые данные поступают от пользователя в программу или отображаются в интерфейсе [26].

LabView предоставляет широкие возможности в графическом оформлении приложений, благодаря этому был сделан интуитивно понятный визуальный интерфейс, отображающий схему блока реактора и параметры моделируемого эксперимента в реальном времени, показанный на Рисунке 3.4.

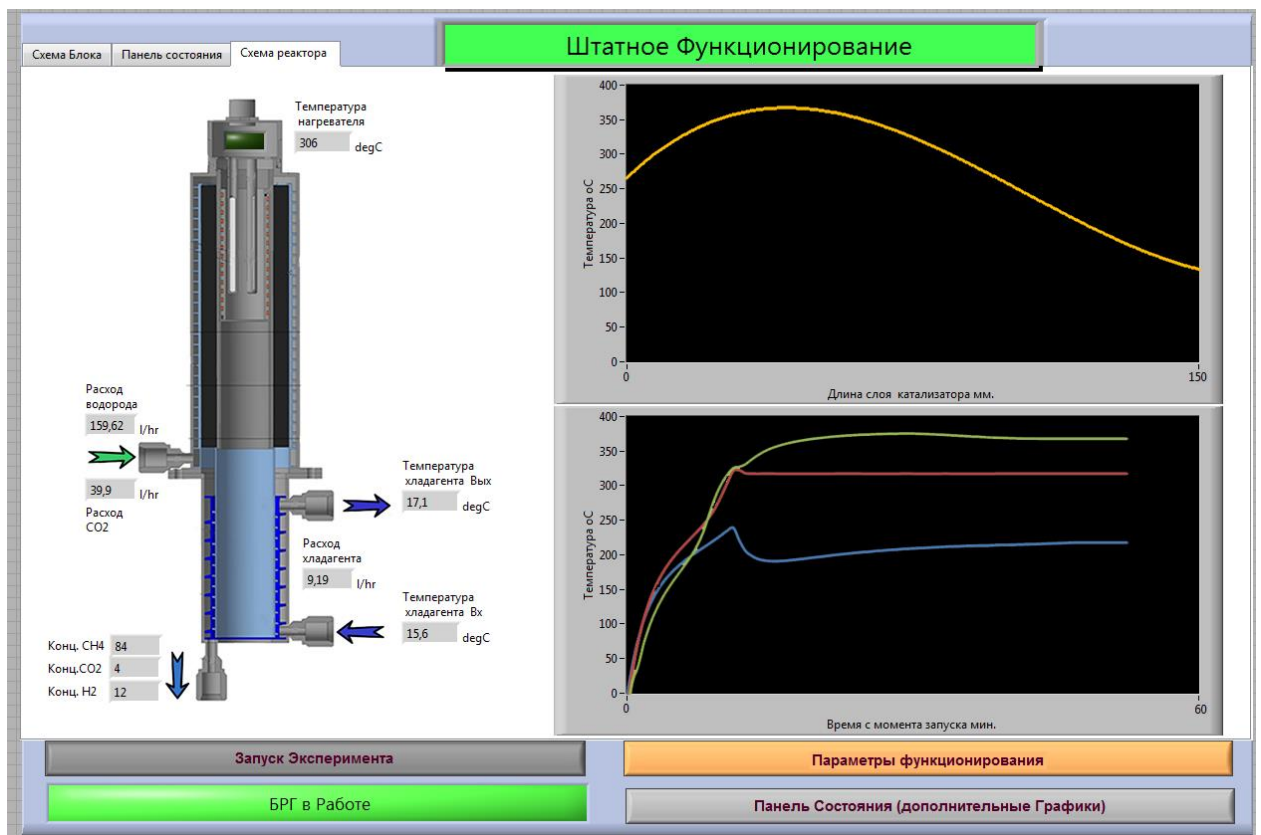


Рисунок 3.4 – Фронтальная панель программы имитатора реактора гидрирования

Ниже приведена программа имитирующая работу основного аппарата блока – реактора гидрирования: блок-диаграмма программы, показанная на рисунке 3.5, разбита на крупные блоки для удобства на этапе программирования. Основная программа имеет 3 блока:

- блок Data Collect, отвечающий за визуальный интерфейс и вспомогательные аппараты;

- блок React SP расчета химической кинетики;
- блок Heat TR расчета внутреннего теплопереноса.

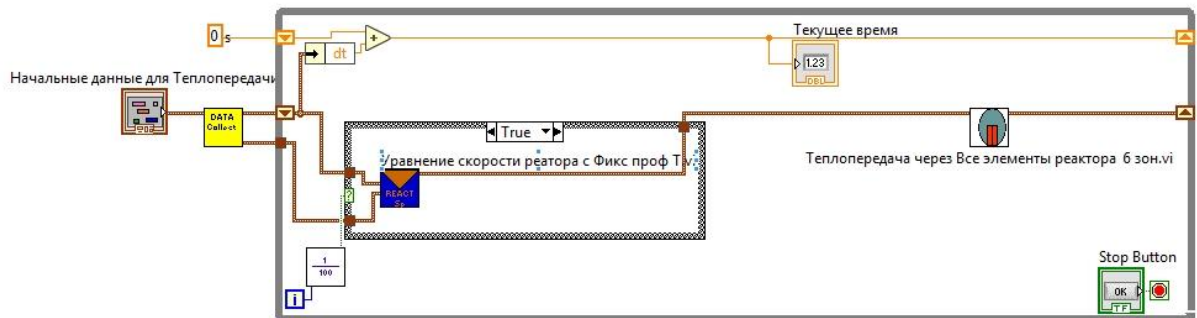


Рисунок 3.5 – Блок-схема основной программы

Крупные вычислительные блоки включают подпрограммы, подробная иерархия которых строится на выполняемых действиях и привязке к конкретной части реактора (Приложение Г).

Основная подпрограмма «React SP», описывающая кинетику реакции, определяет тепловыделение и концентрации веществ в каждом слое катализатора. Для адекватного описания скорости течения реакции Сабатье полость с катализатором разбита на 150 слоев толщиной по 1 мм по направлению течения газов. Снижение количества зон приводит к завышенной степени превращения в первых слоях из-за большего времени контакта в отсутствии продуктов реакции. Увеличение количества зон приводит к росту процессорного времени обработки модели, также методически неверно выбирать зоны значительно меньше размера зерна катализатора.

Блок расчета внутреннего теплопереноса «Heat TR» является второй основной подпрограммой. Для упрощения расчетов теплопереноса корпус реактора разбивается на 6 зон, тепловыделения и концентрации веществ по слоям усредняются для каждой зоны. В качестве примера на рисунке 3.6 приведена подпрограмма расчета температуры одной зоны нагревателя.

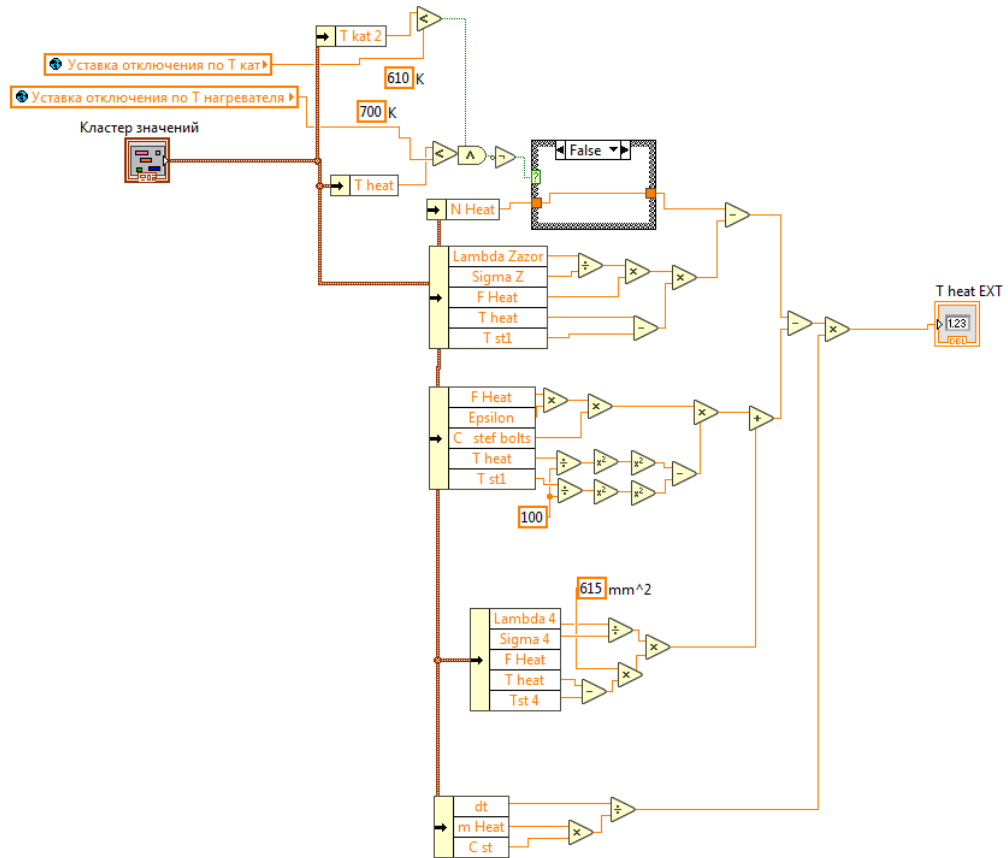


Рисунок 3.6 – Подпрограмма низшего уровня

3.3 Результаты натурального эксперимента верификации модели

Для получения максимального количества сведений о протекании процесса в слое катализатора и верификации функционального описания и программной реализации имитационной модели спроектирован и изготовлен реактор гидрирования (рисунок 3.7), в конструкции которого:

- на наружной и внутренней стенках полости с катализатором расположены по 9 термопар на разных расстояниях от лобового слоя (рисунок 3.8 и Таблица 3.1);
- для снижения радиального градиента температур в слое путем изменения его толщины и соответственно скорости течения газового потока, а также для более эффективного использования выделяемого тепла, нагреватель

размещен внутри реактора, цилиндрический нагревательный элемент большей удельной мощности выполнен по тонкопленочной технологии и находится в специально предназначенном кармане каталитической коробки;

- для снижения теплоемкости и металлоемкости конструкции реактор имеет лишь один контур водяного охлаждения, отсутствует массивный фланец для крепления внутри емкости ЕХДУ, так как на этом этапе предполагалось проведение испытаний вне емкости, используя изолирующую высокотемпературную теплоизоляцию.

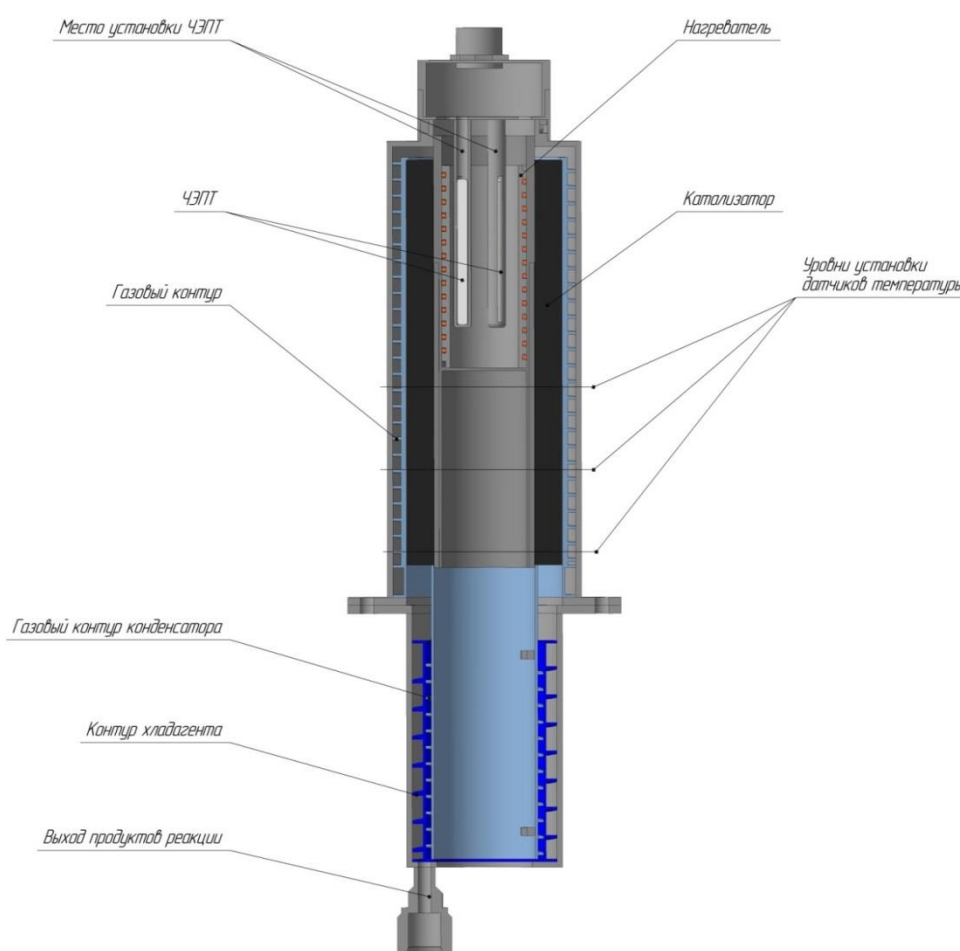


Рисунок 3.7 – Экспериментальный реактор гидрирования (вариант 2)

Таблица 3.1 – Расположение датчиков температуры в реакторе

№ датчика	Расстояние от начала слоя, мм
T1	1

T2	10
T3	20
T4	40
T5	74
T6	100
T7	120
T8	140
T9	145

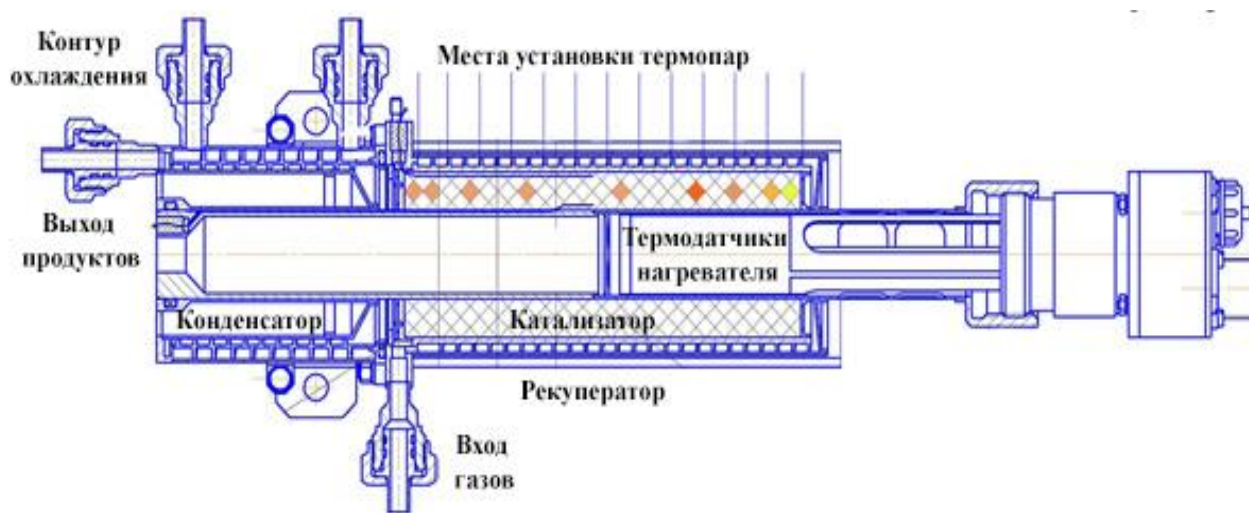


Рисунок 3.8 – Расположение датчиков температуры в слое катализатора

В ходе проектирования реактора, основываясь на результатах моделирования, была изменена конструкция каталитической коробки: во избежание перегрева лобовых слоев катализатора, располагающихся в первой трети длины слоя в осевом направлении и в центральной части в радиальном необходимо было увеличить скорость газового потока в слое и уменьшить его толщину. Для выполнения этих требований, нагреватель был перенесен в специальный карман внутри каталитической коробки, что уменьшило ее площадь проходного сечения и толщину слоя между стенками. Изменения в профилях температур показаны на рисунках 3.9. и 3.10.

Изменение длины слоя было решено не проводить, так как не достигался достаточный прогрев нижних слоёв, и увеличение длины слоя лишь увеличивало габариты аппарата без существенного изменения производительности.

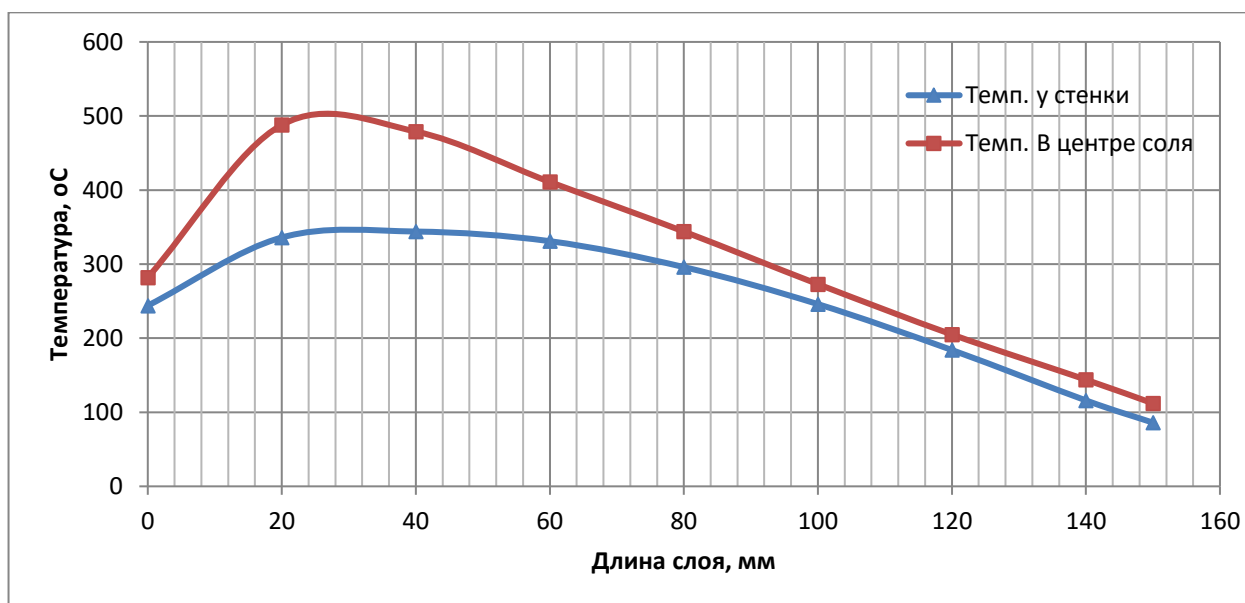


Рисунок 3.9 – Расчетный профиль температур реактора (вариант 1), рассмотренного в главе 2

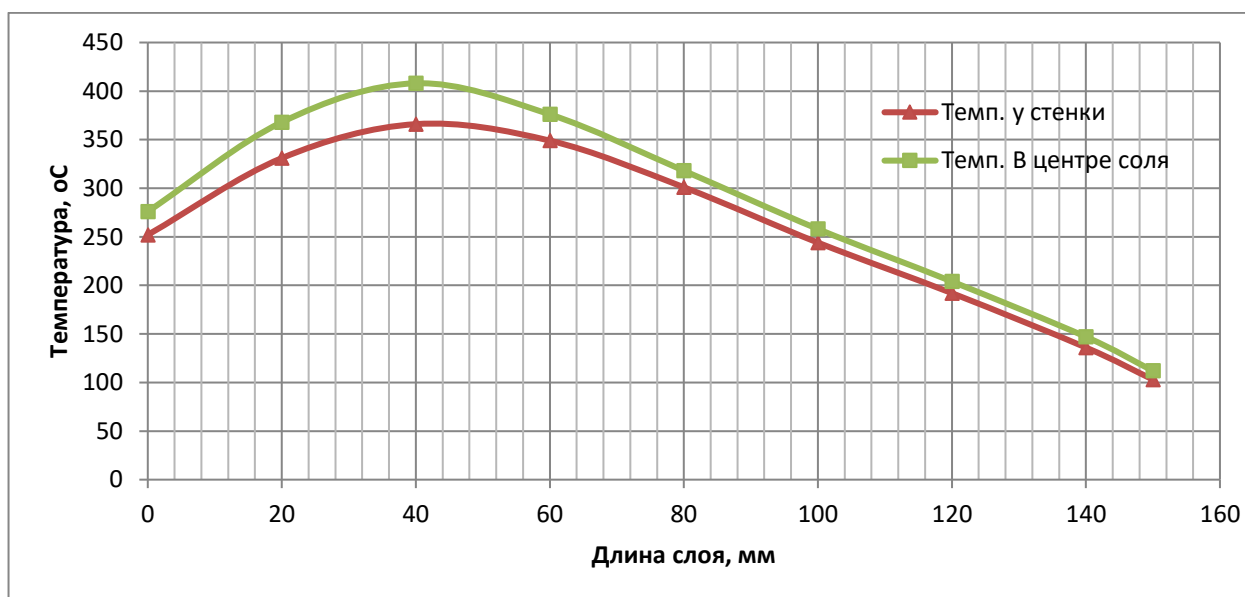


Рисунок 3.10 – Расчетный профиль температур реактора (вариант 2)

В ходе экспериментальных исследований подтверждено, что оптимизация конструкции по результатам моделирования положительно сказались на производительности.

Изменения в конструкции реакционной зоны, рекуператора и теплоизоляции позволили обеспечить стабильное протекание реакции в широком диапазоне расходов и соотношений реагентов.

На штатном режиме работы 160:40 л/ч производительность по воде составляла в среднем 60 г/ч из 64 г/ч теоретически возможных. Температура катализатора на «горячем» слое близка к значениям, описанным как оптимальные для протекания реакции Сабатье на данном типе катализатора [35].

В ходе экспериментов получены данные о распределении температур в слое в зависимости от расходов и соотношений реагентов (рисунки 3.11 и 3.12).

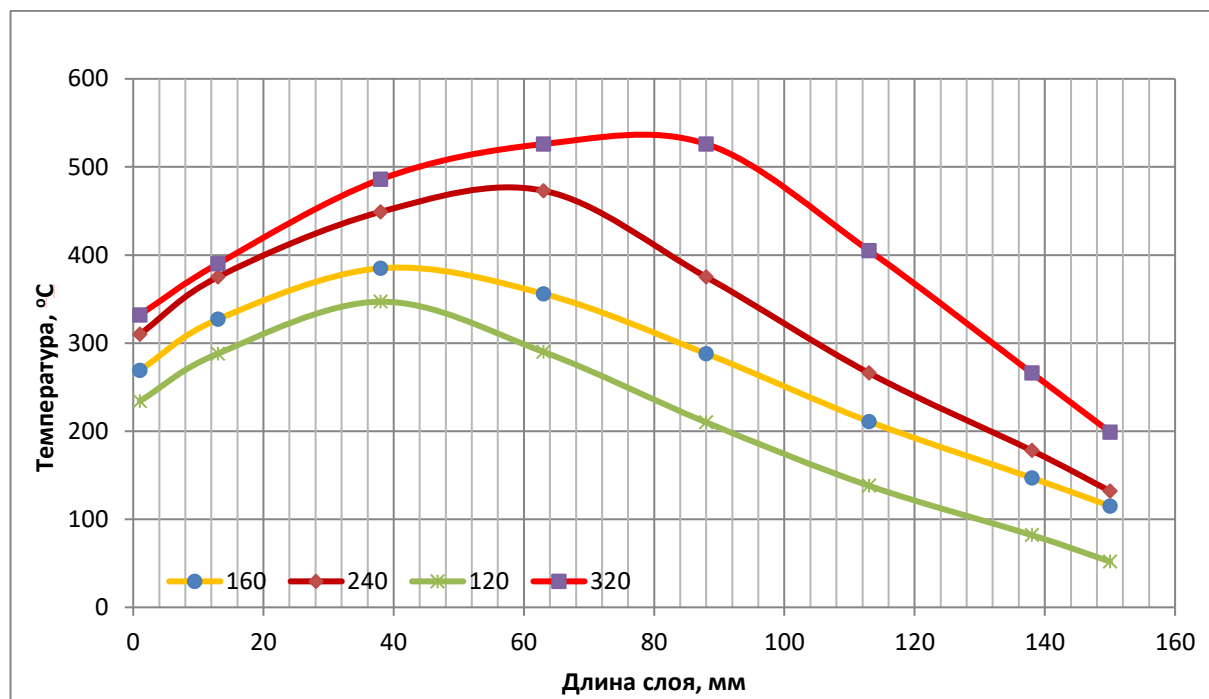


Рисунок 3.11 – Зависимость профиля температур от расхода реагентов реактора (вариант 2)

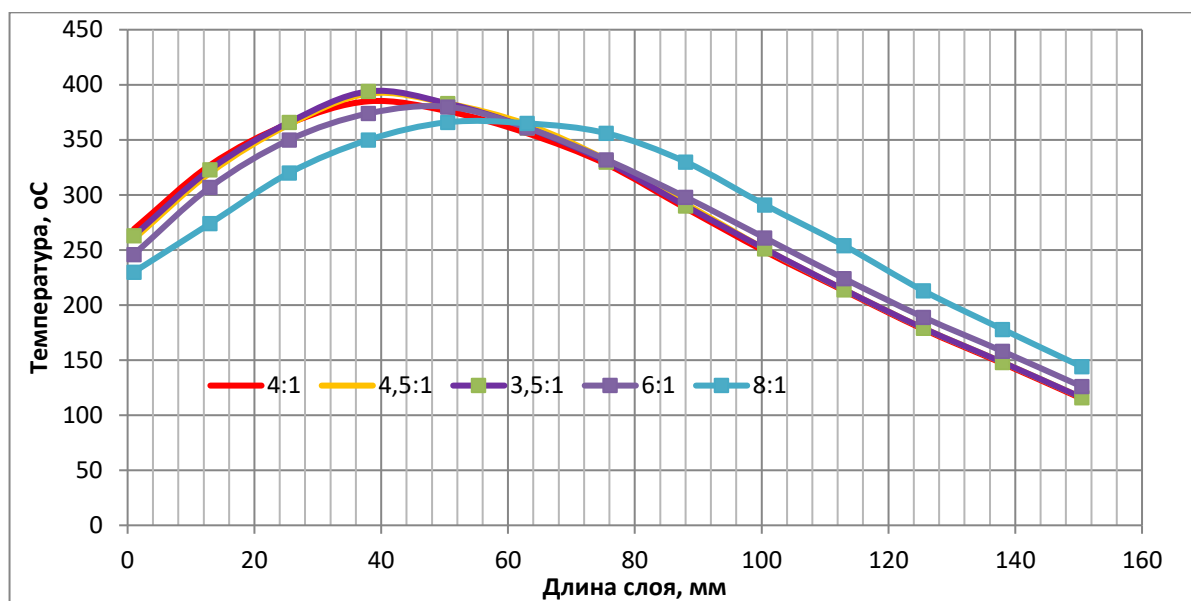


Рисунок 3.12 – Зависимость профиля температур от соотношения реагентов реактора (вариант 2)

Сопоставление результатов натурального и компьютерного экспериментов. Профили температур, определенные в натуральных и компьютерных экспериментах, стали основой для формирования полуэмпирических зависимостей, полученных в ПО TableCurve, аппроксимирующих в форме полиномов зависимости значений температуры от координаты по длине слоя в местах установки термодатчиков на реальном образце. Достигнута высокая сходимость результатов на установившемся режиме (рисунок. 3.13) и на переходном процессе нагрева реактора (рисунок 3.14). Результаты анализа профилей температур в натурном эксперименте на реальном реакторе и компьютерном эксперименте показали, что предельные отклонения температур не превышают 7,5%, а в большинстве точек 3%.

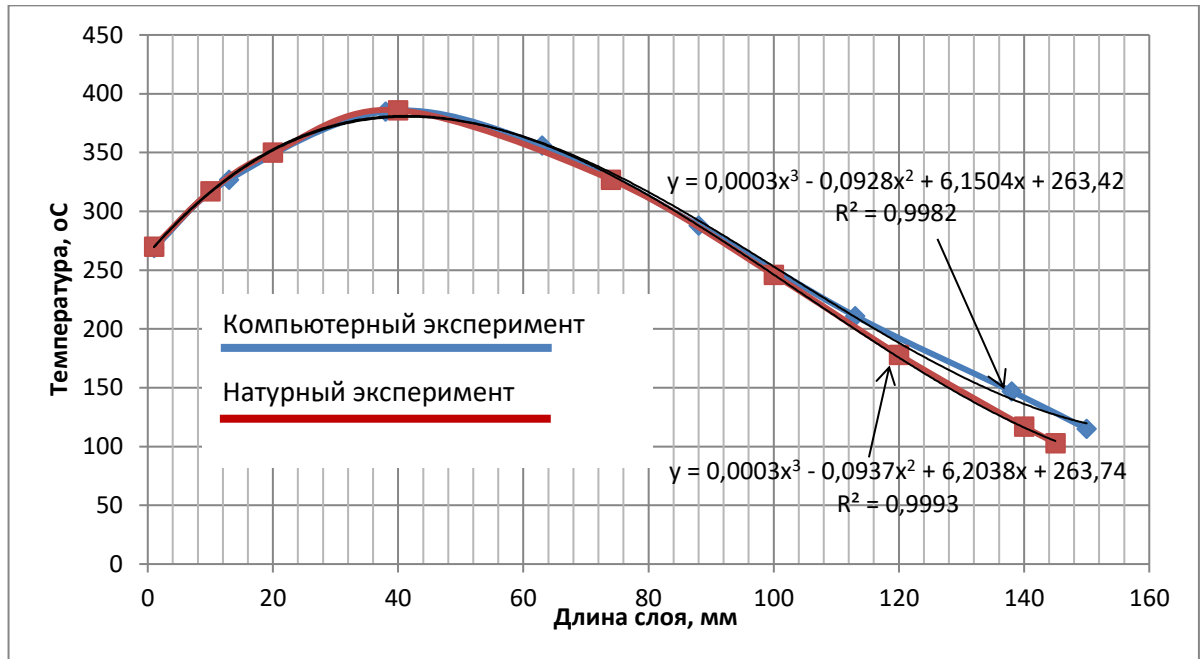


Рисунок 3.13 – Распределение температур по длине слоя для расхода 160:40л/ч для реактора (вариант 2)

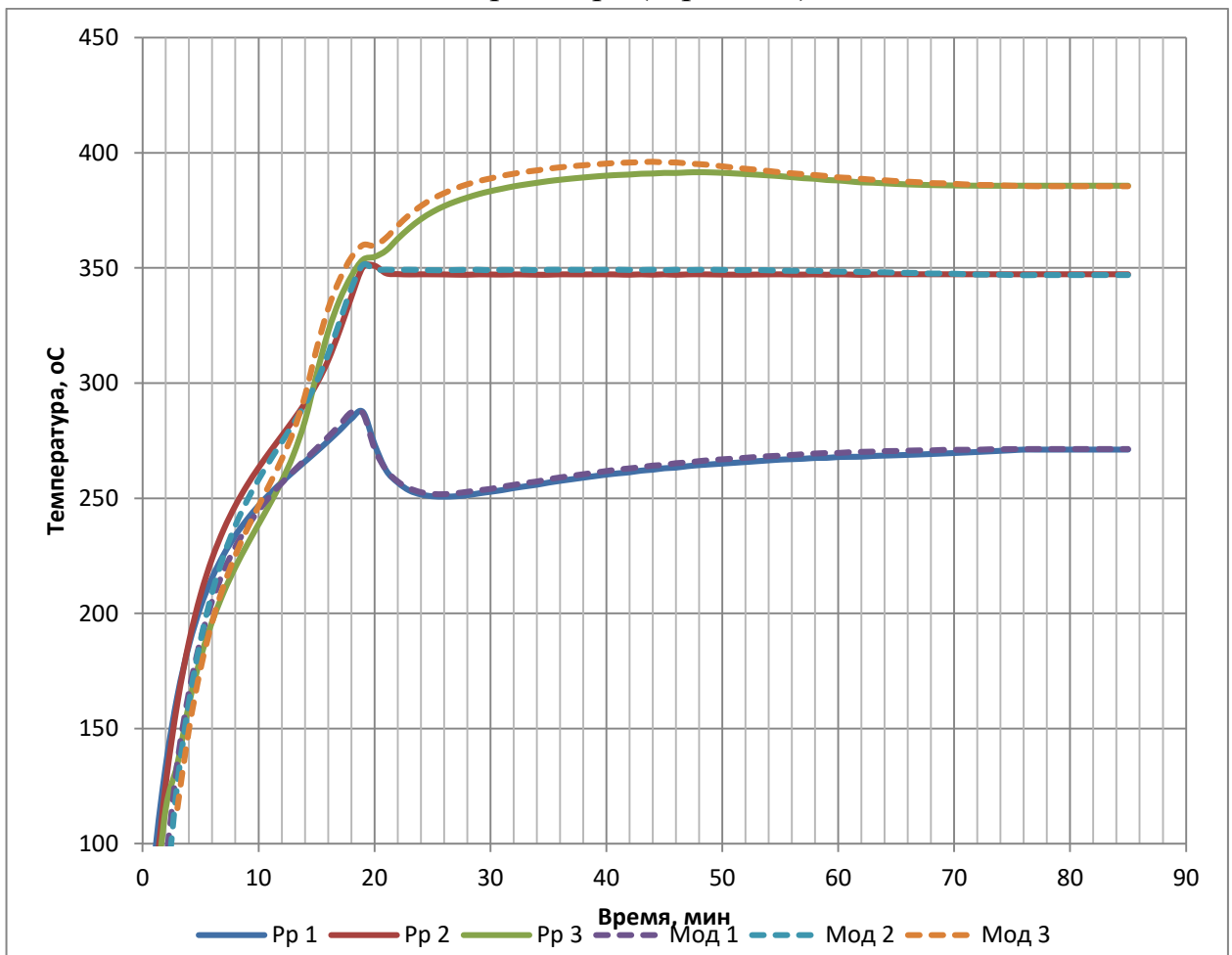


Рисунок 3.14 – Сравнение результатов моделирования с данными натуральных экспериментов для реактора (вариант 2)

3.4 Результаты испытаний

Спроектированный на этом этапе реактор (вариант 2) показал лучшую производительность на всех режимах (рисунок 3.15) по сравнению с реактором (вариант 1), рассмотренном на предыдущем этапе.

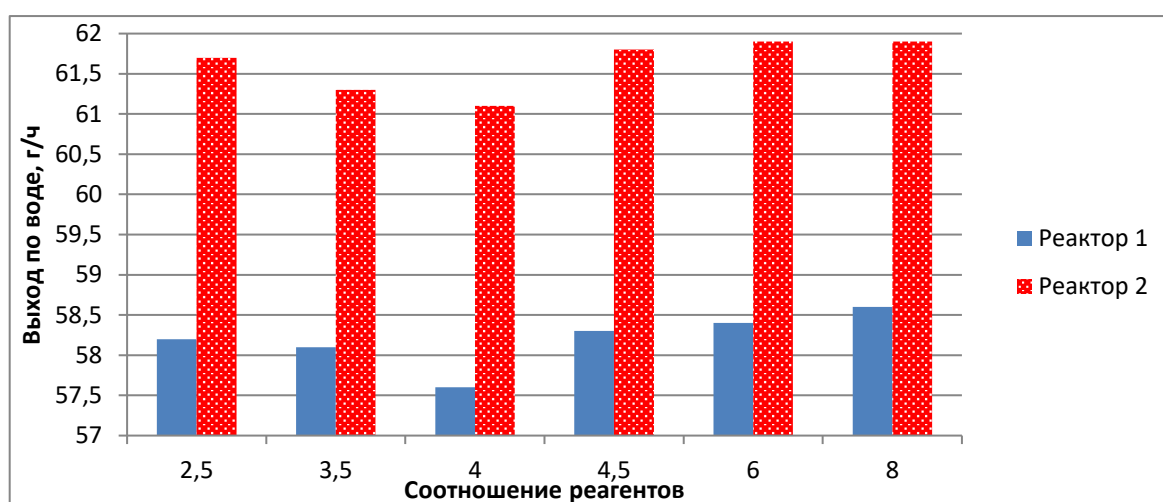


Рисунок 3.15 – Сравнение производительности реакторов (вариант 1 и вариант 2) при различных соотношениях реагентов

Высокая точность моделирования дает возможность использовать данные о производительности реактора и профилях температур из модели для выбора конструктивных параметров разрабатываемого реактора.

Анализируя изменения в работе модельного реактора можно сделать выводы о значимых факторах, влияющих на его производительность. Недостатки реального реактора, выявленные на этом этапе можно объяснить следующим образом:

- захлаживание передних слоев катализатора вызвано недостаточным нагревом газов в рекуператоре и утечкой большого количества тепла с верхнего торца реактора по внешней части стакана нагревателя;
- сдвиг горячей зоны вглубь реактора и резкое падение температуры после нее, что не позволяет газам прореагировать до конца (малая длина «холодного» слоя с температурой, обеспечивающей приемлемую скорость реакции).

Для устранения выявленных недостатков предложены следующие конструктивные решения:

- 1) перенос креплений нагревателя в противоположную часть реактора, что снизит отток тепла;
- 2) изменение теплоизоляции, установка экрана поверх теплоизоляционного материала;
- 3) изменение конструкции рекуператора – винтовой канал с переменным шагом по длине.

В итоге проведения моделирования с учетом данных конструктивных изменений удалось сдвинуть горячую зону ближе к началу реактора, увеличить длину холодной зоны, добиться меньшего градиента температуры в ней, что позволяло достичь более полного превращения реагентов (рисунок 3.16).

По результатам предложено разработать реактор гидрирования новой конструкции (вариант 3).

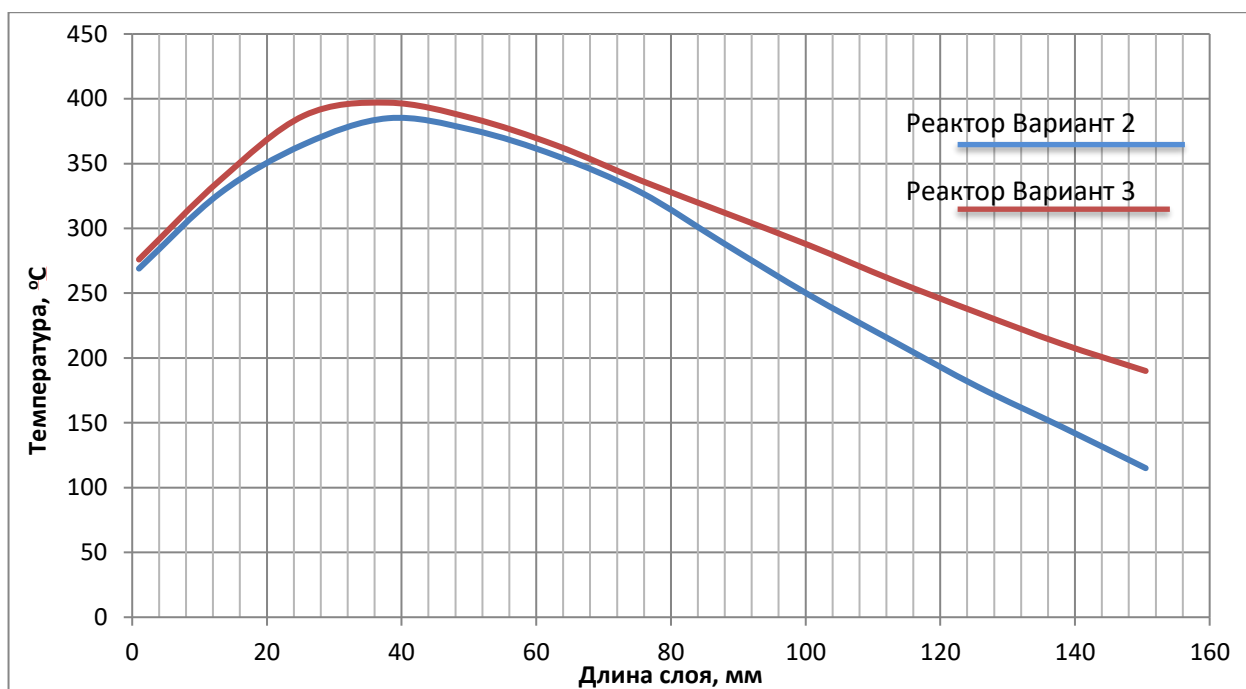


Рисунок 3.16 – Профили температур существующего (вариант 2) *синий цвет* и перспективного реакторов (вариант 3) *красный цвет*, согласно результатам моделирования

ГЛАВА 4 ВЫБОР ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА ГИДРИРОВАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Для выбора технологических параметров проведения процесса гидрирования диоксида углерода разработана обобщенная методика, основанная на результатах испытаний, проведенных на созданной имитационной модели реактора Сабатье, и натуральных испытаний экспериментальных образцов реакторов.

Разработанная методика основана на применении системного анализа к выбору конструктивных параметров блока [19], основные положения которой могут быть сформулированы как:

- макроподход, при котором главное внимание уделяется связям разрабатываемого объекта с другими системами, а не его детальной внутренней структуре, с оценкой обоюдного влияния исследуемого блока на все системы, с которыми он взаимодействует.
- функциональный подход, характеризующийся при исследовании объекта передачей приоритета его целям и функциям.

4.1 Обобщенная методика выбора конструктивных параметров блока гидрирования диоксида углерода

Укрупненная блок-схема алгоритма формирования обобщенной методики выбора проектно-конструктивных параметров блока гидрирования приведена на рисунке 4.1.

Методика построена по блочному принципу и включает четыре основных раздела:

- *Раздел 1:* формирование исходных данных;
- *Раздел 2:* формирование информационного описания;
- *Раздел 3:* синтез морфологического описания;
- *Раздел 4:* синтез функционального описания,

последовательное выполнение которых позволяет получить единое описание БГДУ как функционального блока сложной системы.

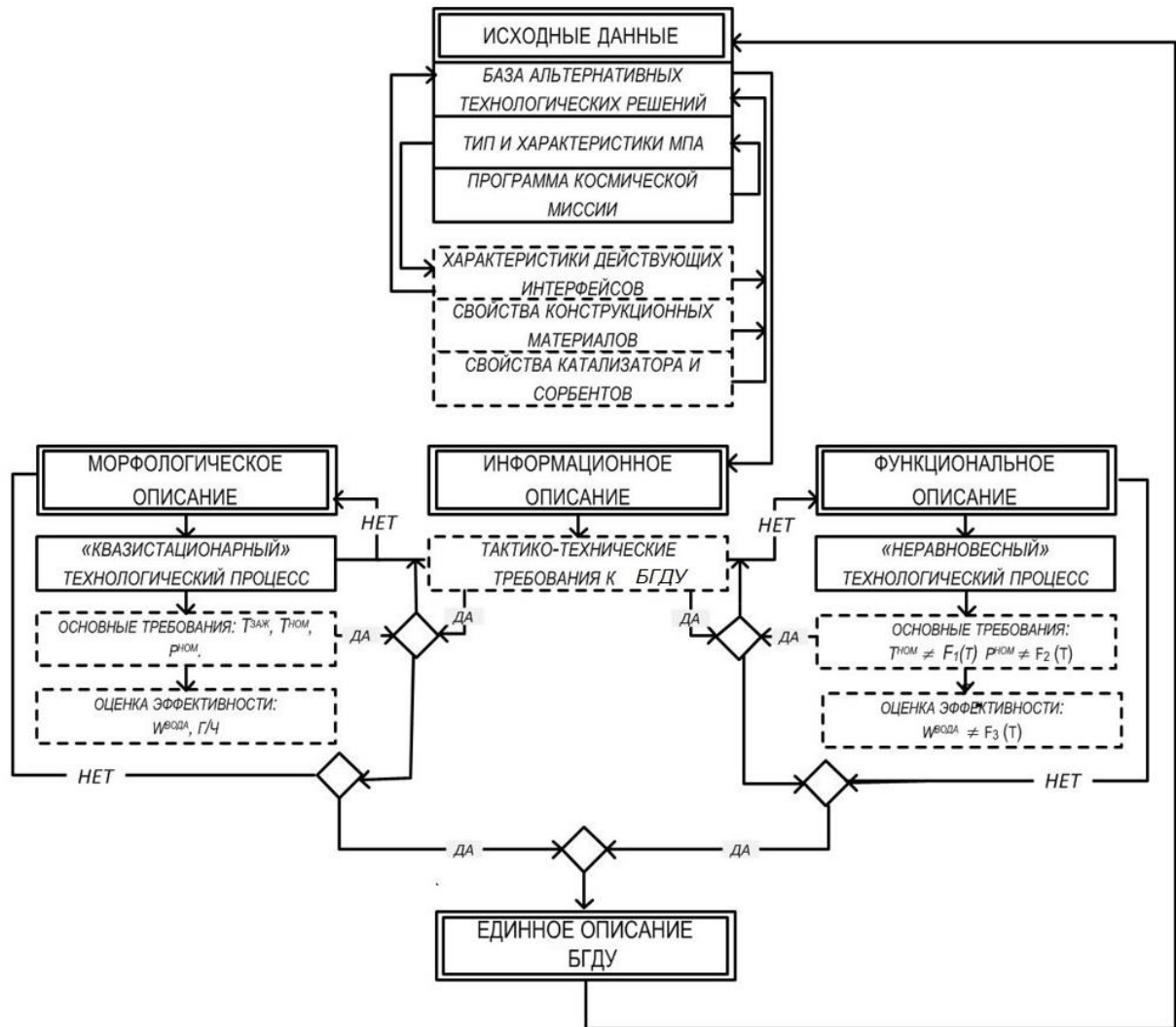


Рисунок 4.1 – Укрупненная блок-схема методики проектирования БГДУ

Раздел 1: формирование исходных данных. Для формирования исходных данных основой является база доступных альтернативных технологий, дополненная данными о программе космической миссии, определяющей численность экипажа, длительность, тип и характеристики межпланетного пилотируемого аппарата, такие, как энергоустановка и ее мощность, система терморегулирования, объем гермоотсеков и т.п.

Подраздел «тип МПА» позволяет предварительно оценить влияние интерфейсов с бортовыми системами на выбор проектно-конструктивных

параметров БГДУ, необходимое для корректного формирования информационного описания (раздел 2).

Раздел 2: формирование информационного описания. Информационное описание отражает тактико-технические и медико-биологические требования и формализованную цель создания БГДУ, позволяющую проводить оценку эффективности.

Формализовано данное описание может быть сформулировано в форме системы неравенств с нечеткими ограничениями, определяющими допустимый диапазон изменения параметров состояния системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall \varphi_i \exists \omega_i: A_i \leq \varphi_i < B_i \\ \varphi \equiv \{\varphi_i(Q_i)\} \\ \varphi_i = f(Y_i[Q_i(\{|S_i|\}_j, \{\bar{S}_i\}_j, \underline{C})]) \end{array} \right., \quad (4.1)$$

где A_i и B_i – предельные значения функционала φ_i ;

$Q_i(\{|S_i|\}_j, \{\bar{S}_i\}_j, \underline{C})$ – свойство связанной системы;

ω_i – значимость (вес) данного свойства;

Y_i – значение переменной, описывающей данное свойство;

$i = \overline{1 \dots n}; j = \overline{1 \dots m}$.

Разрабатываемая конструкция функционального блока должна обеспечить заданное значение суммарного веса $\sum_i \omega_i$ удовлетворенных требований при соответствии цели ЭТС МПА \underline{C} с учетом действующих ограничений, таких как работа блока в «автотермическом» режиме при определенных значениях температуры и давления в зоне реакции [25].

В качестве характеристики эффективности используется отношение количества воды, вырабатываемой БГДУ в «автотермическом» режиме к теоретическому выходу по воде реакции Сабатье [27].

Раздел 3: синтез морфологического описания предназначен для определения проектно-конструктивных параметров реактора гидрирования (рисунок 4.2).

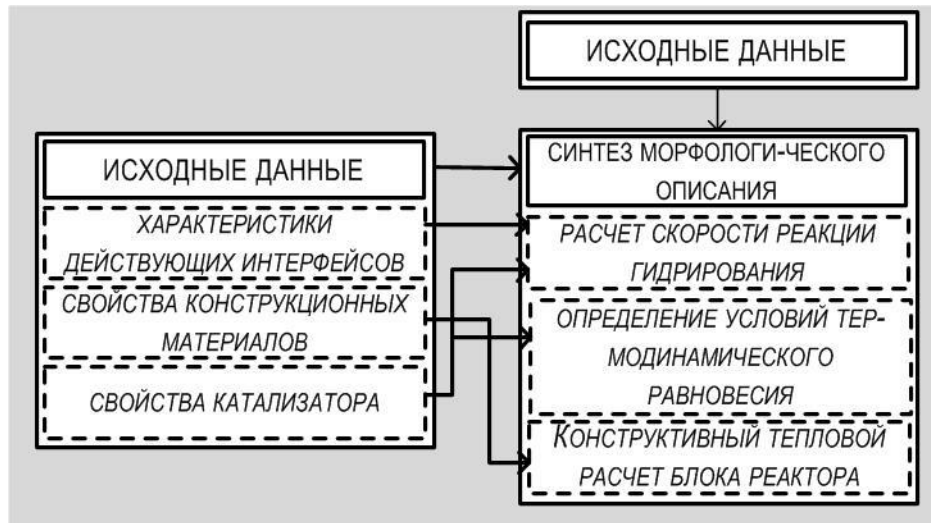


Рисунок 4.2 – Блок-схема методики расчета проектно-конструктивных параметров реактора гидрирования

На первом этапе данного раздела выполняется расчет термодинамического равновесия в реакционной зоне для определения влияния условий проведения реакции, таких как: скорость химической реакции, определяемая типом катализатора; расход и соотношение реагентов; распределение температур и давления в слое катализатора на равновесный состав продуктов реакции.

Наличие математического описания процесса Сабатье, качественно и количественно описывающего процессы в слое катализатора, позволяет разработать имитационную модель реактора, дополняя формализованное описание процессов в слое уравнениями, описывающими взаимодействие реакционной зоны с остальными элементами: нагревателем, рекуператором и конденсатором на основе решения полудетализированной сопряженной задачи тепло- и массопереноса при граничных условиях третьего рода.

Анализ результатов вычислительных экспериментов, проведенных при различных условиях позволяет выделить параметры модели, оказывающие существенное влияние на характер распределения температур в слое и достигаемую степень превращения.

Математическая модель всего блока в целом позволит провести численное исследование функционирования объекта при различных технологических, конструктивных и эксплуатационных параметрах и определить его

конструктивные возможности: максимальный диапазон параметров, работая в которых блок соответствует требованиям технического задания.

Совместное рассмотрение диапазонов изменения выбранных параметров, определяемых условиями эксплуатации блока и выбранной конструкцией, позволяет выбрать направление их оптимизации.

Синтез функционального описания. Эколого-техническая система МПА относится к классу сложных систем, характеризующихся наличием таких общесистемных свойств как устойчивость, помехозащищенность, управляемость и самоорганизация. Данные свойства обеспечиваются соответствующей технологической структурой (морфологическим описанием) и законами функционирования (функциональным описанием), обеспечивающими достижение цели системы.

Функционирование системы и входящих в нее отдельных функциональных блоков может быть определено, как безотказная работа в расчетном режиме по заданному алгоритму.

Функциональное описание исходит из того, что всякая система выполняет определенные функции, может быть однофункциональной и многофункциональной. Функциональное описание (функциональная модель) должно характеризовать правильную ориентацию в отношении внешних связей системы, ее взаимодействия с внешней средой в составе ЭТС, направлений изменения законов функционирования под воздействием возмущающих и управляющих воздействий. Обычно функции системы выполняются в рамках ограничения значений параметров системы определенными пределами, вне которых система радикально меняет свои свойства, выходя за рамки нормального функционирования [22].

В качестве основы формирования функционального описания выбрана расчетная схема конечного автомата (рисунок 4.3), характеризующегося:

- алфавитом входных состояний $X \equiv X\{Q\}$;
- алфавитом выходных состояний $Y \equiv Y\{Q\}$;

- алфавитом внутренних состояний, задаваемого функционально $Z \equiv Z[\{Q\}, W\{Q\}, U\{Q\}]$;
- внешними возмущающими воздействиями W ;
- управляющими воздействиями U .

Здесь $\{Q\}$ – множество общесистемных и характеристических свойств функционального блока.

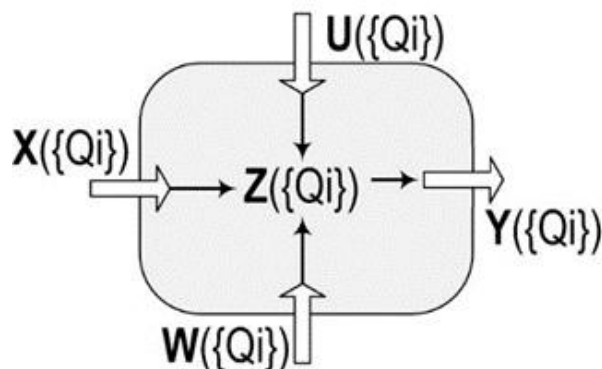


Рисунок 4.3 – Расчетная схема конечного автомата при формировании функционального описания

4.2 Результаты синтеза морфологического описания

На данном этапе работ изготовлен реактор гидрирования, предложенный в прошлой главе, параметры которого выбраны исходя из результатов моделирования. Поставленная цель – создание конструктивного образа блока гидрирования: комплекса аппаратов, отвечающих как за обеспечение протекания реакции, так и за подготовку реагентов, коммутацию с бортовым оборудованием, разделение газо-жидкостной смеси, перекачку и хранение полученного конденсата в условиях невесомости. Блок должен стать прообразом летного образца блока гидрирования для эксплуатации на борту космического аппарата.

Стандовый образец блока, показанный на рисунке 4.4, состоит из следующих элементов: реактора гидрирования Р201, электронного регулятора соотношения реагентов РСР, фильтров очистки входящих реагентов Ф201, Ф202, термоэлектрического холодильника-конденсатора КТ201, разделителя газо-

жидкостной смеси CM201, мембранной емкости EM201 и насоса для откачки полученного конденсата H2O1.

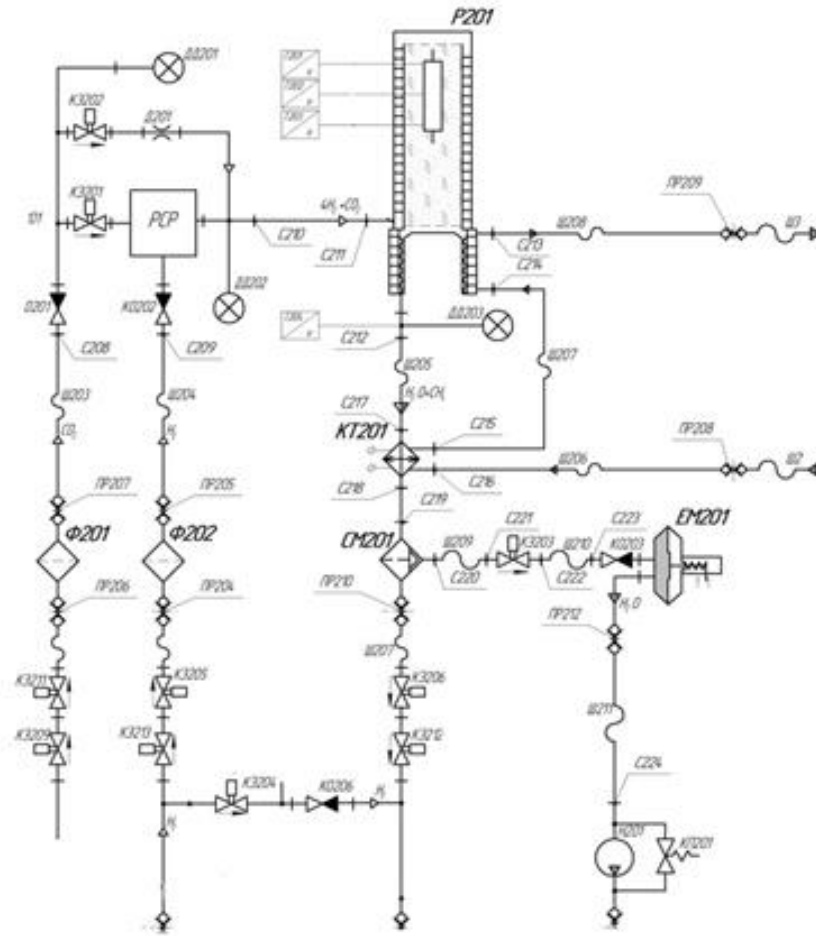


Рисунок 4.4 – Схема функционального блока гидрирования

Переход к работе с блоком гидрирования в целом требовался для отработки режимов работы реактора в условиях, приближенных к его реальной эксплуатации на борту МПА.

4.3 Формализованное описание аппаратов блока гидрирования

Программа, имитирующая работу реактора гидрирования, была значительно доработана под поставленные цели и стала частью, комплекса симулирующего работу и отображающего расчетные параметры всего блока.

Структуру программы можно описать следующей блок-схемой (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Схема имитатора блока гидрирования

Имитаторы внутриблочных элементов:

– *Конденсатор реактора гидрирования*

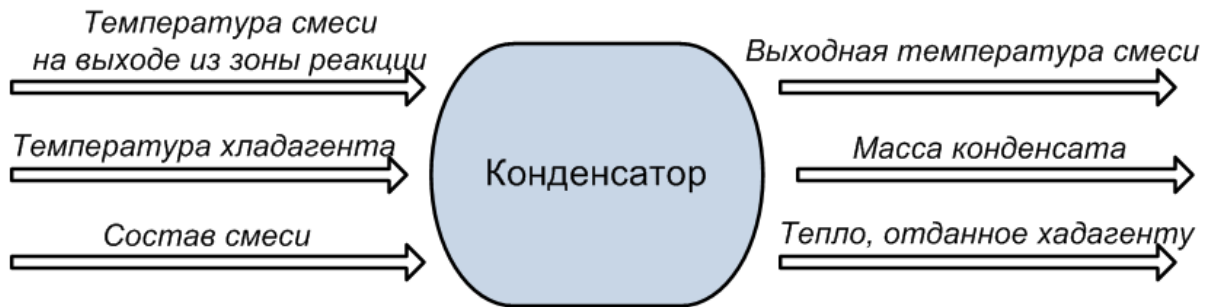


Рисунок 4.6 – Схема звена «Конденсатор реактора гидрирования»

Основным уравнением, описывающим процессы, происходящие в конденсаторе, является уравнение теплопередачи:

$$Q_{\text{конд}} = \alpha F \frac{\Delta T_6 - \Delta T_M}{\ln \frac{\Delta T_6}{\Delta T_M}}. \quad (4.2)$$

При конденсации пара из парогазовой смеси его концентрация у поверхности теплообмена становится меньше концентрации пара в ядре потока смеси. Возникновение градиента концентрации приводит к появлению потока массы пара J_n направленного к поверхности конденсации, плотность которого определяется законом Фика:

$$j_n = -\rho D \frac{\partial m_n}{\partial n} = -D \frac{\partial p_n}{\partial n}, \quad (4.3)$$

где j_n – плотность потока массы пара, кг/м²·с);

D – коэффициент молекулярной диффузии пара относительно газа, м²/с);

$\frac{\partial m_{\text{п}}}{\partial n}, \frac{\partial p_{\text{п}}}{\partial n}$ – градиенты концентрации пара по нормали к поверхности тела.

Плотность потока массы пара, если считать что смесь подчиняется уравнению состояния идеального газа, определяется из соотношения:

$$j_{\text{п}} = \frac{\beta}{R_{\text{п}}T} (P_{\text{п}0} - P_{\text{п.пов}}), \quad (4.4)$$

где β – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентрации пара в потоке смеси и у поверхности конденсации, м/с;

$P_{\text{п}0}$ – парциальное давление пара в потоке парогазовой смеси;

$P_{\text{п.пов}}$ – плотность, массовая концентрация и парциальное давление пара у поверхности конденсации;

$R_{\text{п}}$ – газовая постоянная пара, Дж/кг·К.

Парциальное давление пара в основном потоке $P_{\text{п}0}$ может быть рассчитано по соотношению, справедливому для идеального газа:

$$P_{\text{п}0} = P_{\text{п.пов}} \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_{\text{п}}}, \quad (4.5)$$

где $\mu_{\text{см}}$ и $\mu_{\text{п}}$ – молярные массы парогазовой смеси и пара;

$P_{\text{п}0}$ – давление смеси, МПа;

парциальное давление пара у поверхности конденсации $P_{\text{п.пов}}$ определяется по таблицам термодинамических свойств пара на линии насыщения [38].

Плотность теплового потока, передаваемого к поверхности теплообмена при совместном протекающих процессах тепло- и массообмена, без учета перегрева парогазовой смеси и переохлаждения конденсата, определяется по уравнению:

$$q = q_{\text{к}} + q_{\text{м}} = \alpha_{\text{к}}(t - t_{\text{с}}) + j_{\text{п}}r = \alpha_{\text{см}}(t - t_{\text{с}}), \quad (4.6)$$

где $q_{\text{к}}$ и $q_{\text{м}}$ – плотности тепловых потоков, при конвективном теплообмене и массообмене, Вт/м²;

$\alpha_{\text{к}}$ – конвективный коэффициент теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности теплообмена, Вт/м²·К);

r – теплота конденсации, Дж/кг;

$\alpha_{\text{см}}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвективный теплообмен и массообмен, Вт/ м²·К.

Приведенный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{см}$ в случае пленочной конденсации определяется как:

$$\alpha_{см} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ж}} + \frac{r\beta\rho_{п0} - \rho_{п.пов}}{RT} \frac{1}{t - t_{п.пов}}} \quad (4.7)$$

Для исследования совместно протекающих процессов тепло- и массообмена при конденсации пара из парогазовой смеси чаще всего используются аналогии между теплоотдачей и массоотдачей. Теоретическим обоснованием аналогии является сходство дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплообмена и массообмена.

На основании этого процесс массоотдачи может быть рассчитан по уравнениям для конвективной теплоотдачи с заменой чисел подобия теплообмена на числа подобия массообмена [38]:

$$Nu = c Re^n Pr^m; \quad (4.8)$$

$$Nu_D = c Re^n Pr_D^m, \quad (4.9)$$

где $Nu_D = \frac{\beta d_{п}}{\lambda_m}$ – диффузионное число Нуссельта;

$Pr_D = \frac{\nu}{D}$ – диффузионное число Прандтля.

В кольцевом канале конденсатора реализуется пленочная конденсация. Уравнение теплового баланса газожидкостной смеси / охлаждающей жидкости можно записать в виде:

$$G_1(h'_1 - h''_1) - \Delta G_{гжс} c_{гжс} T_{гжс} = G_{ож} c_{ож} (T''_{ож} - T'_{ож}), \quad (4.10)$$

где G_1 – массовый расход неконденсирующейся части ПГС, кг/с;

h'_1, h''_1 – энтальпии парогазовой смеси на входе в аппарат и выходе из аппарата, отнесенные к 1 кг неконденсирующегося газа, рассчитываемые по зависимости:

$$h = h_{г} x_{г} + h_{п} x_{п}, \quad (4.11)$$

где $h_{г}$ и $h_{п}$ – удельные энтальпии;

$x_{г}$ и $x_{п}$ – массовые доли газа и пара ($x_{г} = G_2/G_1$; $x_{п} = G_n/G_1$);

$\Delta G_{гжс}$ – изменение массового расхода газожидкостной смеси в связи с конденсацией, кг/с;

$c_{\text{ГЖС}}$ – удельная теплоемкость газожидкостной смеси, Дж/кг·К;

$G_{\text{ОЖ}}$ – массовый расход охлаждающей жидкости, кг/с;

$c_{\text{ОЖ}}$ – удельная теплоемкость охлаждающей жидкости, Дж/кг·К;

$T''_{\text{ОЖ}}$ и $T'_{\text{ОЖ}}$ – температуры на выходе и входе в аппарат соответственно, К.

Количество и состав газожидкостной смеси, поступающей в конденсатор, определяется по уравнению реакции, зная расходы входящих реагентов и степень превращения (подробно описано в предыдущей главе). В ходе охлаждения происходит конденсация влаги, и пар в выходящей ГЖС постоянно находится в насыщенном состоянии. Влагосодержание d смеси определяется следующим образом:

$$d = \frac{R_{\text{газ}}}{R_{\text{пара}}} \frac{P}{(P - P_{\text{пара}}(T))}. \quad (4.12)$$

– *Термоэлектрический холодильник*



Рисунок 4.7 – Схема звена «Термоэлектрический холодильник»

Процессы, протекающие в термоэлектрическом холодильнике во многом аналогичны происходящим в конденсаторе. Дополнительное количество отведенного тепла рассчитывается через холодильный коэффициент и подводимую электрическую мощность:

$$Q_{\text{ж}} = Q_{\text{ГЖС}} + W, \quad (4.13)$$

где $Q_{\text{ж}}$ – теплота, поступающая в жидкостную систему охлаждения;

$Q_{\text{ГЖС}}$ – теплота, отводимая от газожидкостной смеси;

W – энергия, расходуемая на совершение работы L по перемещению зарядов против разности электрических потенциалов, возникающих в цепи при неравенстве температур $T_{ГЖС}$, $T_{Ж}$ в соответствии с законом Зеебека:

$$L = \alpha I (T_{ГЖС} - T_{Ж}), \quad (4.14)$$

где α – коэффициент дифференциальной термо-ЭДС, зависящий от типа термоэлемента [6];

I – сила тока, А.

По разнице температур ГЖС на входе и выходе из аппарата определяется получаемое количество конденсата.

– *Разделитель газожидкостной смеси*

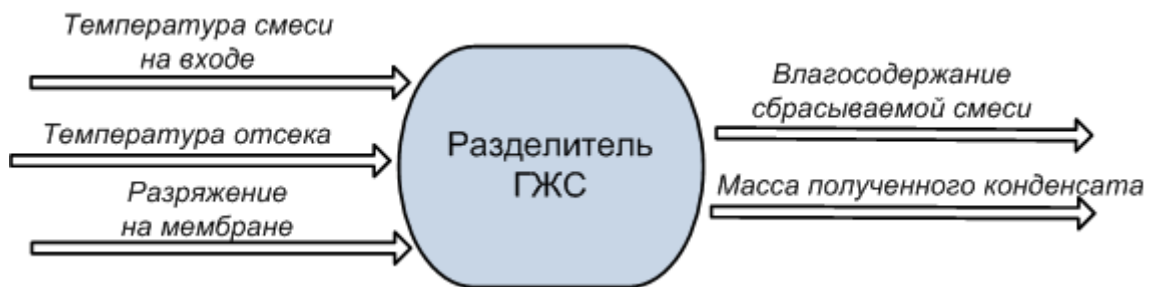


Рисунок 4.8 – Схема звена «Разделитель ГЖС»

Условием работоспособности мембранного разделителя является наличие разности давлений на мембране, которая не должна превышать величину критического давления внутри пор, что может привести к прорыву газа через мембрану. Используемые полимерные мембраны имеют поры размером 0,15 – 0,2 мкм.

Согласно уравнению:

$$\Delta P = 2\sigma \cos\theta / R_{пор}, \quad (4.15)$$

где ΔP – предельный перепад давления на мембране;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

θ – угол смачивания;

$R_{пор}$ – радиус пор мембраны.

При перепаде давления до 0,15 кг/см² через капилляры проходит только жидкость, и не проходит газ. Перепад давления на элементе обеспечивается

усилием пружины мембранной емкости (ЕМ), по мере заполнения пружина совершает рабочий ход, и создаваемое усилие снижается. Логика работы ЕМ заключается в поддержании требуемого перепада давления на элементе, путем периодической откачки из нее накопившейся жидкости, сопровождаемой взведением пружины в исходное положение. Степень заполнения определяется концевыми выключателями.

Разделитель обменивается теплом с окружающей средой, его тепловой баланс можно записать в следующем виде:

$$T_{\text{мфр}} = G_{\text{гжс}} C_{\text{гжс}} (T_{\text{мфр}} - T_{\text{гжс}}) - kF(T_{\text{окр.ср}} - T_{\text{мфр}}). \quad (4.16)$$

Охлажденная ГЖС с расходом $G_{\text{гжс}}$ и теплоемкостью смеси $C_{\text{гжс}}$ поступает в фильтр из термохолодильника с температурой $T_{\text{гжс}}$, где вследствие потерь холода через стенки и теплоизоляцию фильтра нагревается, что влияет на влагосодержание на выходе и требует оценки.

Служебные бортовые системы:

- При составлении функционального описания *системы энергообеспечения (СЭО)* принято допущение о циклическом изменении напряжения 26 до 31В при орбитальном полете [5].
- Система терморегулирования объекта (СТР) характеризуется, циклически меняющейся температурой охлаждающей жидкости в пределах 15-20°C при постоянном расходе [5].
- Система генерации кислорода «Электрон-ВМ», являющаяся источником водорода, определяет его расход, влажность и содержание микропримесей.

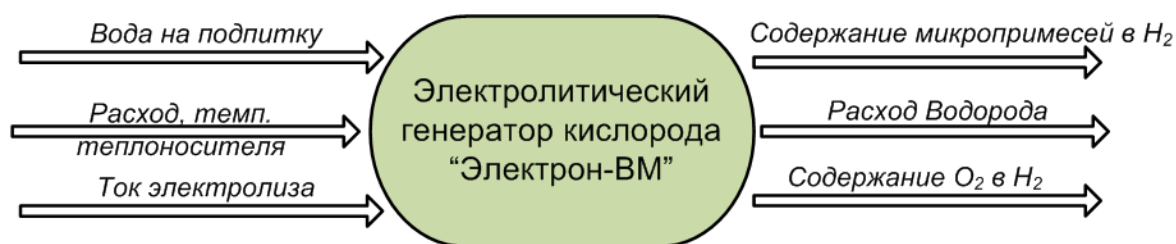


Рисунок 4.9 – Схема звена «Система генерации кислорода «Электрон-ВМ»»

Учитываются 4 режима работы системы при значениях тока электролиза – 24, 32, 48, 64 А. Содержание микропримесей постоянно и известно из результатов испытаний, что позволяет определить ресурс фильтров и их влияние на течение реакции.

- *Блок концентрирования диоксида углерода (БКДУ)* в зависимости от режима функционирования имеет 4 режима работы реактора гидрирования с расходами диоксида углерода 20, 40, 60, 80 нл/ч при фиксированном содержании микропримесей.



Рисунок 4.10 – Схема звена «БКДУ»

Визуальный интерфейс имитатора. В среде LabView составлена программа, описывающая работу блока, включающая удобный человеко-машинный интерфейс, визуально отображающий состояние БГДУ.

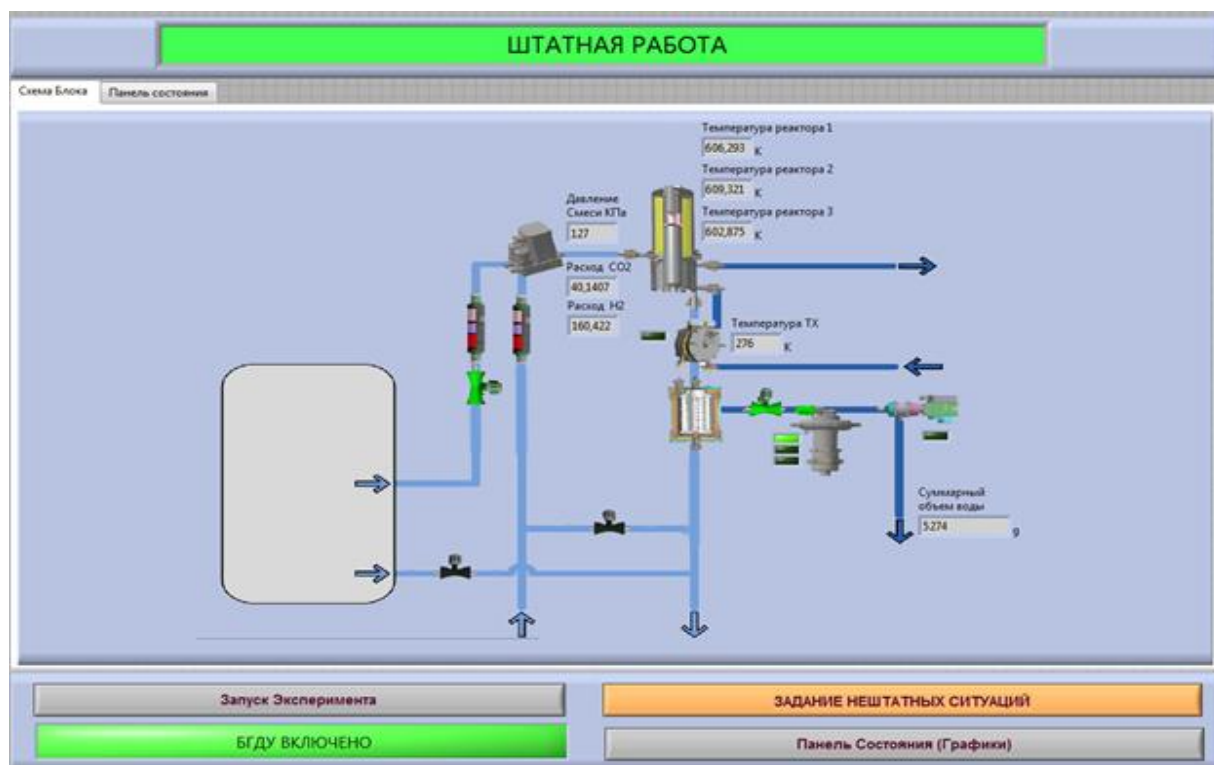


Рисунок 4.11 – Визуальный интерфейс программы

В функционал программы входит:

- имитация работы функционального блока гидрирования в реальном и ускоренном времени;
- отображение основных параметров на мнемосхеме системы;
- вывод любых задействованных величин в виде графиков в дополнительных окнах программы;
- имитация нештатных ситуаций;
- протоколирование результатов в виде, аналогичном ПО испытательного стенда.

4.4 Результаты моделирования работы блока гидрирования

В главе 3 показана хорошая сходимость результатов моделирования и реальной работы реактора гидрирования. Проведена аналогичная проверка адекватности имитационной модели всего блока гидрирования. При этом контролируемые параметрами явились следующие:

- выход по воде;
- время работы нагревателя, прогрева и выхода на устойчивый автотермический режим;
- энергопотребление, тепловая нагрузка на СТР и тепловые потери в газовую среду;
- функционирование служебных бортовых систем;
- адекватность имитации работы вспомогательных агрегатов.

Реактор гидрирования, рассматриваемый в этой главе, не имел датчиков температуры в слое, а лишь три датчика в нагревателе, расположенных на одинаковом уровне, тролирующих друг друга с целью резервирования и увеличения надежности. Данная конструкция позволяет определить лишь усредненную характерную температуру процесса. Исходя из расположения нагревателя и размеров используемых датчиков типа ЧЭПТ 100, принимается, что они измеряют

усредненную температуру в слое катализатора на расстоянии 12 – 57 мм от входа в каталитическую коробку. Исходя из этого, для проверки адекватности моделирования были взяты усредненные данные температуры на аналогичном участке модельного реактора. На рисунке 4.12 показано изменение характерной температуры процесса гидрирования по времени, начиная с момента запуска в ходе выхода на автотермический режим.

Как видно на графических зависимостях, в ходе нагрева нарастает отклонение результатов, полученных на модели, относительно экспериментальных данных. Это вызвано наличием значимых тепловых сопротивлений в конструкции реального нагревателя, что приводило к некоторой инерционности датчиков температуры. В момент подачи сигнала на отключение нагревателя (прогрева датчика до нужной температуры) поверхность нагревательного элемента имела несколько более высокую температуру и еще некоторый промежуток времени продолжала нагрев датчиков, вызывая возрастающие по мере прогрева корпуса реактора забросы температуры выше установленных рамок. В то время как на модели нагреватель был описан в упрощенном виде: металлический стержень, заданных размеров и массы с равномерно распределенной по поверхности тепловой мощностью. В дальнейшем нагреватель был описан, как тонкостенный цилиндр, на поверхности которого идет выделение тепла, а температура определялась в центре, соединенном со стенками перегородками, имеющими термическое сопротивление. Данное изменение позволило увеличить точность моделирования динамического процесса запуска, но, вне зависимости от описания нагревателя, не оказывало влияния на определение установившейся температуры автотермического режима.

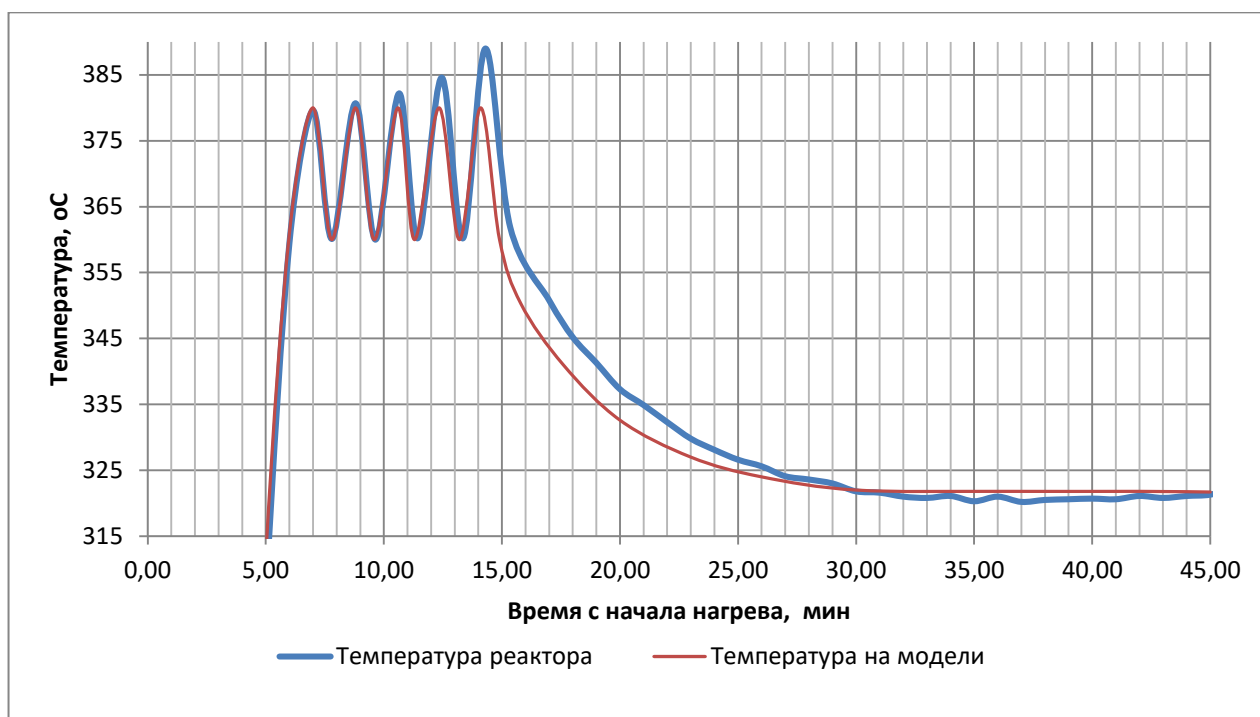


Рисунок 4.12 – Изменение температуры в реакторе (вариант 3 в составе БГДУ) в ходе нагрева и выхода на автотермический режим

Рассматривая динамику зажигания реакции по выходной концентрации метана, также видна хорошая сходимость во время запуска и почти полное соответствие смоделированных результатов экспериментальному реактору на установившемся автотермическом режиме (рисунок 4.13).

Рассматривая установившийся автотермический режим, выход по воде экспериментального реактора (измеренный по количеству конденсата и по приросту массы силикагеля, в патроне-осушителе, установленном на стенде после статического сепаратора) отличается от смоделированного результата менее, чем на 1% в худшую сторону, а степень превращения составила не менее 96%. Выход по воде на различных соотношениях реагентов показан на рисунке 4.14.

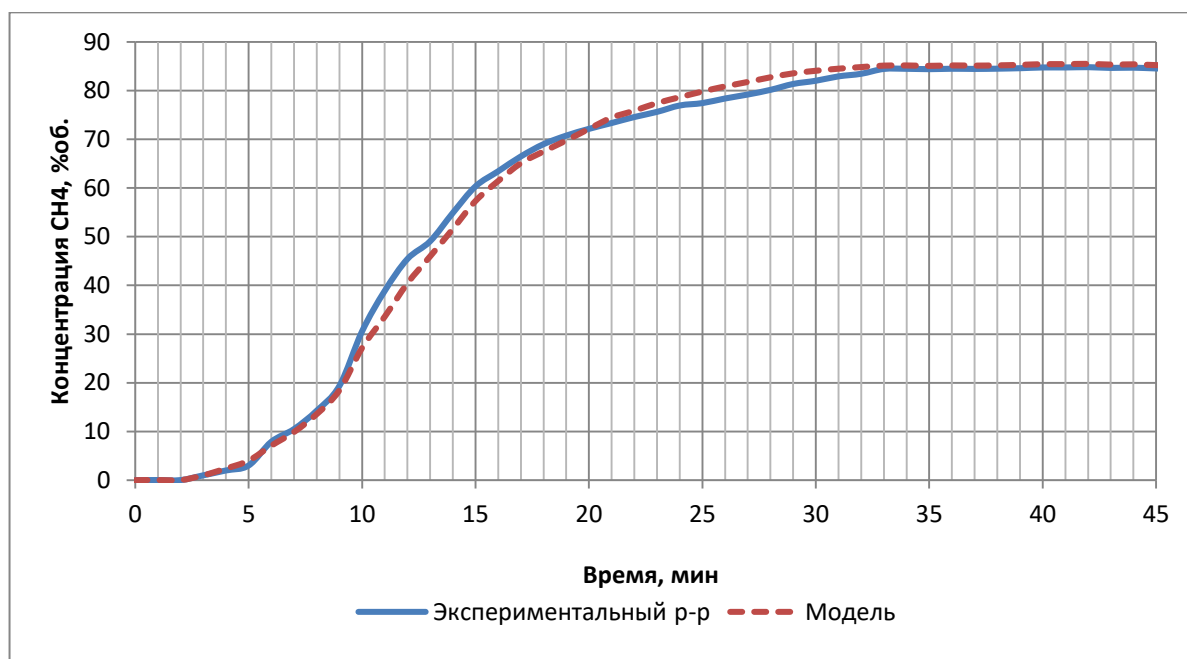


Рисунок 4.13 – Выход по метану в ходе нагрева и выхода на автотермический режим реактора (вариант 3 в составе БГДУ)

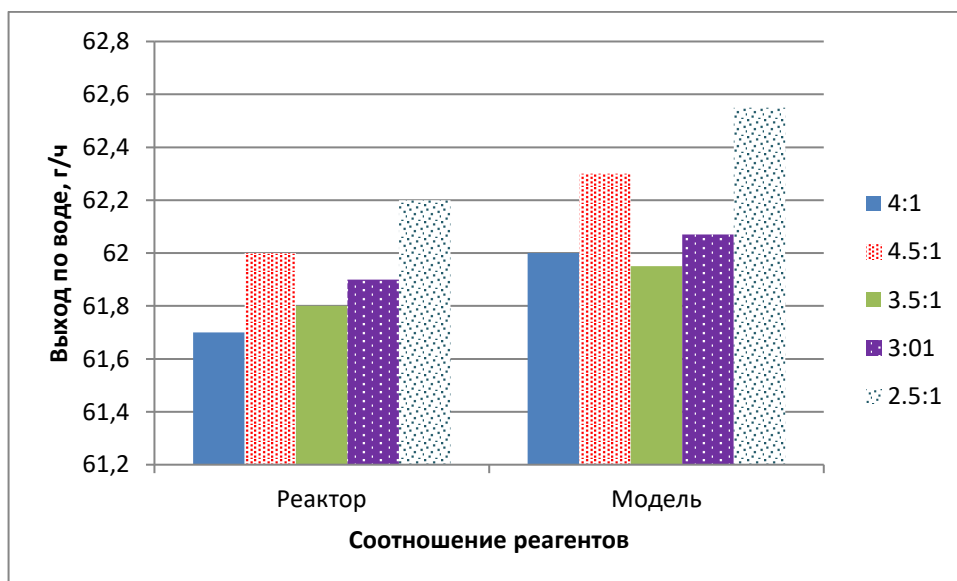


Рисунок 4.14 – Выход по воде на экспериментальном реакторе (вариант 3 в составе БГДУ) и модели

При рассмотрении нештатных ситуаций (НШС), которые могут возникнуть в ходе реальной эксплуатации БГДУ, в модель были добавлены их имитаторы, позволяющие убедиться в адекватной реакции модели на эти возмущения.

Были выделены следующие НШС:

- выход расхода H_2 за установленные рамки;
- низкое качество подаваемого CO_2 (содержание $O_2 > 4\%$ об.);

- отсутствие циркуляции охлаждающей жидкости в СТР;
- отказ термоэлектрического холодильника.

На примере снижения расхода водорода ниже границ автотермического режима (до 80 л/час) показана адекватность моделирования динамики изменения температуры в реакторе и выхода по метану (рисунок 4.15).

Переходя к имитации функционирования всего блока также видна хорошая сходимость с моделью. Это позволило выявить и устранить потери целевого продукта и еще приблизить производительность к теоретически возможной. Имея верифицированную модель БГДУ в целом, рассматривая все учтенные факторы, влияющие на работу блока можно сделать заключение о его производительности.

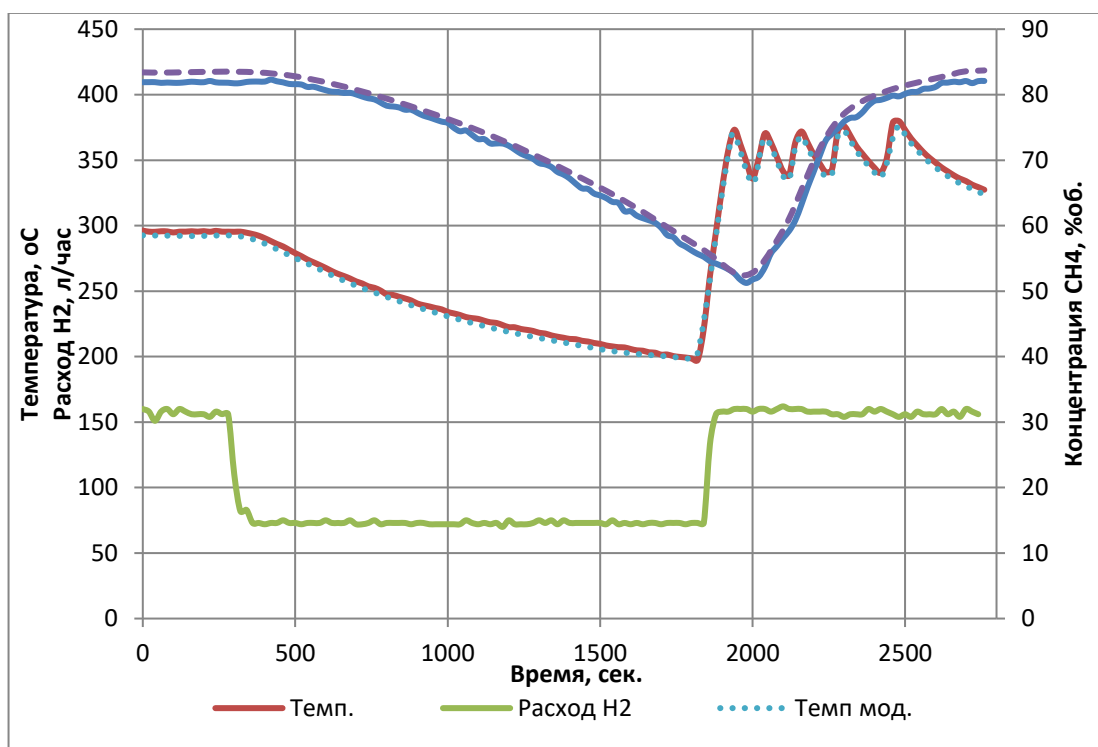


Рисунок 4.15 – Динамика изменения температуры и концентрации метана на модели и реальном реакторе (вариант 3 в составе БГДУ) в случае НшС

На основном режиме работы на 3-х членов экипажа получены следующие результаты:

- 1) В блок поступает 160 нл/час водорода, содержащие 1,8 г воды, что определяется влажностью насыщенных паров над щелочью при температуре охлаждающей электролизер жидкости в 20°С. Данная транспортная влага не оказывает существенно влияния на равновесие процесса Сабатье.

2) Блок концентрирования диоксида углерода снабжает блок гидрирования диоксидом углерода с чистотой не ниже 98% в объеме 40 литров, оставшийся углекислый газ перепускается, минуя реактор, и не учитывается. В поданном в реактор объеме диоксида углерода содержится до 0,4% кислорода и 0,04 г/час воды (что достигается осушкой исходящего газа на силикагеле до точки росы не ниже минус 20°C в самом блоке концентрирования) – можно допустить эти величины пренебрежительно малыми.

3) В ходе реакции гидрирования, идущей с достигнутой степенью превращения в 95,4% образуется 61,7 г/час воды, вместе с ней в газожидкостной смеси будет содержаться 38,3 нл/час образовавшегося метана, 6,4 нл/час водорода и 1,6 нл/час диоксида углерода, не прореагировавших в ходе реакции.

4) После выхода из сепаратора при температуре в 3°C объем газовых сбросов составит 48 нл/час, уносящих с собой 0,3 г/час воды в виде паров.

5) Суммарный объем собранного конденсата будет составлять 63,2 мл/час из 64,28 мл/час возможных, что говорит о высокой степени совершенства разработанного БГДУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработана обобщенная методика расчета технологических параметров блока гидрирования диоксида углерода в квазистационарном и динамическом режимах функционирования. На основе разработанной методики выполнено проектирование блока гидрирования, во многом определяющее его облик.

Результаты проведенного анализа показали, что имеющиеся конструкции каталитических реакторов для проведения реакции гидрирования не обеспечивают устойчивого поддержания автотермического режима. Это приводит к дополнительным энергетическим затратам при их функционировании.

Разработана имитационная модель каталитического реактора, реализованная в среде графического программирования NI LabView. На основе модели разработана оригинальная конструкция реактора гидрирования, функционирующего в автотермическом режиме.

На основе вычислительных и натуральных экспериментов получены новые экспериментальные данные по тепловым режимам реактора гидрирования, позволившие вывести полуэмпирические зависимости для расчета температурных полей. По результатам натуральных экспериментов проверена адекватность имитационной модели каталитического реактора. Расхождение результатов компьютерных экспериментов относительно натуральных не превышает 7% по значениям температуры в реакторе и 3% по выходу целевого продукта.

Обоснованы преимущества проведения процесса гидрирования диоксида углерода в автотермическом режиме перед изотермическими реакторами с подогревом.

Разработана обобщенная методика выбора проектно-конструкторских параметров блока гидрирования, определяющая его облик. На этой основе спроектирован и изготовлен штатный образец блока.

Изготовленный опытный образец блока гидрирования показал хорошую производительность по целевому продукту, соответствующую расчетным

величинам, и на момент публикации работы успешно проходит ресурсные испытания, по завершении которых будет изготовлен второй опытный образец, предназначенный для летных испытаний на борту Международной космической станции, как часть системы СПДУ, разрабатываемой АО «НИИхиммаш», в рамках государственной программы Российской Федерации «МКС Эксплуатация – 4».

Предложена имитационная модель блока гидрирования, включающая реактор гидрирования, вспомогательные аппараты и служебные системы межпланетного космического аппарата. Модель позволяет проводить анализ функционирования и технического состояния блока в штатном режиме и при возникновении нештатных ситуаций.

Закономерным развитием данного исследования может стать дополнение методики расчета блоком выбора технологических параметров реактора пиролиза метана, позволяющего извлечь водород из продуктов реактора гидрирования и направить его на переработку, тем самым добиться еще более высокой степени замкнутости цикла СЖО по воде. Разработка данного блока находится на этапе технического предложения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей рукописи диссертации применяют следующие сокращения и обозначения.

АПКОЭС	– аппаратно-программный комплекс обслуживания экипажем систем жизнеобеспечения
АС МКС	– американский сегмент МКС
АСКУ	– автоматизированная система контроля и управления
БГДУ	– блок гидрирования диоксида углерода
БИИВ	– блок имитации источника водорода
БИИДУ	– блок имитации источника диоксида углерода
БИСВ	– блок имитации сброса газов в вакуум
БИСТР	– блок имитации системы терморегулирования
БКДУ	– блок концентрирования углекислого газа
ГАА	– газоаналитическая аппаратура
ЕХДУ	– емкость хранения диоксида углерода
ЗИП	– комплект запчастей и принадлежностей к изделию
ИРСЖО	– интегрированная регенеративная система жизнеобеспечения
КА	– космический аппарат
КЛА	– космический летательный аппарат
ЛА	– летательный аппарат
МКС	– Международная космическая станция
МПА	– межпланетный космический аппарат
НшС	– нештатная ситуация
ОКС	– орбитальная космическая станция
ПГС	– парогазовая смесь
ПО	– программное обеспечение
СВО	– система водообеспечения
СГГ	– сигнализатор присутствия горючих газов

СЖО	– системы обеспечения жизни и деятельности экипажа
СИГС	– система индикации количественного состава газовой смеси
СОГС	– система обеспечения газового состава
СПДУ	– система переработки диоксида углерода
СПУ-ГВ	– система переработки углекислого газа до газообразных продуктов и воды
СТР	– система терморегулирования
СЭВ	– система электролиза воды
СЭП	– система электропитания
ЭТС	– эколого-техническая система
ACLS	– система очистки атмосферы, разработанная ESA, включающая в себя блок электролиза воды, блок концентрирования диоксида углерода и блок переработки диоксида углерода, объединенные в одной агрегатной стойке
ARS	– блок реактора гидрирования системы ACLS
ESA	– Европейская космическая ассоциация
CRA	– блок переработки CO ₂
IRLSS	– см. ИРСЖО
JEM	– японский модуль МКС
JAXA	– Японское космическое агентство
LabView	– Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench – комплекс программного обеспечения для визуального программирования
NASA	– Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства
RWGS	– Reversed water gas shift reaction (CO ₂ +H ₂ =CO+H ₂ O) – обратная реакция конверсии водяного пара
VI (ВП)	– Виртуальный прибор

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамович, Б. А. Жизнь вне Земли / Б. А. Адамович, В. А. Горшенин. – Москва : РАУ-КОРПОРАЦИЯ, 1997. – 591 с.
2. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. – Москва : Химия, 1979.
3. Беляков, И. Т. Основы космической технологии : учебное пособие для вузов / И. Т. Беляков, Ю. Д. Борисов. – Москва : Машиностроение, 1980. – 184 с.
4. Бобе, Л. С. Перспективы развития регенерационных систем жизнеобеспечения для длительных пилотируемых полетов : предварительный анализ / Л. С. Бобе, Э. А. Курмазенко, Л. И. Гаврилов // Вестник Московского авиационного института. – 2008. – № 1, том 15. – С. 17–25.
5. Бобе, Л. С. Опыт работы регенерационных систем жизнеобеспечения экипажей на космических станциях «Салют», «Мир» и МКС / Л. С. Бобе, Н. М. Самсонов, Л. И. Гаврилов [и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2008. – №6/1 – С. 10–12.
6. Булат, Л. П. Термоэлектрические охлаждающие устройства : метод. указания для студентов спец. 070200 «Техника и физика низких температур» / Л. П. Булат, Е. В. Бузин. – Санкт-Петербург : СПбГУНиПТ, 2001. – 41 с.
7. Бусленко, Н. П. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем / Н. П. Бусленко. – Москва : Наука, 1977. – 240 с.
8. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – Москва : Наука, 1968. – 355 с.
9. Веников, Г. Б. Выбор структур для реализации математических моделей / Г. Б. Веников, Б. З. Голембо, О. Ф. Радужский // Техническая кибернетика. – Москва : ВИНТИ, 1976. – С.329–374.
10. Воронин, Г. И. Жизнеобеспечение экипажей космических кораблей / Г. И. Воронин, А. И. Поливода. – Москва : Машиностроение, 1967. – 212с.

11. Вязгин, В. А. Математические методы автоматизированного проектирования / В. А. Вязгин, В. В. Федоров. – Москва : Высшая школа, 1989. – 184 с.
12. Гаврилов, Л. И. Математическое моделирование процесса теплообмена в каталитическом реакторе Сабатье / Л. И. Гаврилов, С. В. Маркин, Н. К. Корнейчук // Труды МВТУ. – 1976. – № 222, вып. 3.
13. Глебов, И. В. Прогнозирование функционирования перспективной системы обеспечения газового состава для длительных автономных пилотируемых космических полетов / И. В. Глебов, Э. А. Курмазенко, С. Ю. Романов, А. Г. Железняков // Труды МАИ. – 2014. – № 73. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=48477> (дата обращения: 04.10.2020).
14. Гуцин, В. Н. Основы устройства космических аппаратов: учебник для вузов / В. Н. Гуцин – Москва : Машиностроение, 2003. – 272 с.
15. Дедков, В. К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем / В. К. Дедков, Н. А. Северцев. – Москва : Высшая школа, 1976. – 406 с.
16. Елисеев, А. С. Техника космических полетов / А. С. Елисеев. – Москва : Машиностроение, 1983. – 307 с.
17. Киперман, С. Л. Основы химической кинетики в гетерогенном катализе / С. Л. Киперман. – Москва : Химия, 1979.
18. Климарев, С. И. Регенерационная система обеспечения газового состава / С. И. Климарев, Ю. Е. Синяк, Э. А. Курмазенко // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2013. – Т. 47, № 2.
19. Курмазенко, Э. А. Анализ функционирования систем жизнеобеспечения / Э. А. Курмазенко. – Москва : НИИхиммаш, 1995. – 66 с.
20. Курмазенко Э. А. Функциональный анализ систем жизнеобеспечения : учебное пособие / Э. А. Курмазенко. – Москва: НИИхиммаш, 1997. – 60 с.
21. Курмазенко, Э. А. Создание имитационной модели обслуживания экипажем регенерационных систем жизнеобеспечения по программе автономного полета на Марс / Э. А. Курмазенко, Л. И. Гаврилов, Н. Н. Хабаровский, Г. Р. Камалетдинова // Тезисы докладов 12-й Международной научной

конференции «Системный анализ, управление и навигация». – Москва : МАИ, 2007.

22. Курмазенко, Э. А. Принципы выбора перспективных технологий для интегрированной системы жизнеобеспечения межпланетного пилотируемого корабля / Э. А. Курмазенко, А. А. Кочетков, В. Ю. Прошкин [и др.] // Труды МАИ. – 2017. – № 93. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80262> (дата обращения: 04.10.2020).

23. Курмазенко, Э. А. Энергетика систем жизнеобеспечения / Э. А. Курмазенко, С. Н. Кутепов, В. В. Малоземов. – Москва : МАИ, 1989. – 68 с.

24. Курмазенко, Э. А. Итоговый отчет «Разработка математической модели обслуживания экипажем СЖО и СОТР в длительном наземном эксперименте и её программная реализация» / Э. А. Курмазенко, В. В. Малоземов, Г. И. Морозов [и др.] – Москва : НИИхиммаш, 2006. – 71 с.

25. Курмазенко, Э. А. Виртуальные имитаторы регенерационных систем жизнеобеспечения для наземного эксперимента по программе автономного полета на Марс / Э. А. Курмазенко, М. Ю. Томашпольский, Л. И. Гаврилов [и др.] // 7-я Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в Космос», Звездный городок, Московская область. – Королев: Изд-во ЦПК, 2007. – С. 220.

26. Курмазенко, Э. А. Автоматизированная система управления. Аппаратно-программный комплекс обслуживания экипажем систем регенерации систем жизнеобеспечения в проекте МАРС-500 / Э. А. Курмазенко, Н. Н. Хабаровский, Л. И. Гаврилов [и др.] // Тезисы докладов 13-й Международной конференции «Системный анализ, управление и навигация». – Москва: МАИ, 2008.

27. Курмазенко, Э. А. Моделирование и выбор конструктивных схем автотермических блоков реакторов / Э. А. Курмазенко, Д. А. Носов. – Москва : МАИ, 1987 – С. 2–14. – Деп. в ВИНТИ СССР, № 2158 – В88.

28. Курмазенко, Э. А. Аппаратно-программный комплекс обслуживания экипажем регенерационных систем жизнеобеспечения / Э. А. Курмазенко,

Н. Н. Хабаровский, Л. И. Гаврилов [и др.] // 3rd Space and Society Conference «Space: the Human Dimension», Днепропетровск, Украина. – 2009.

29. Курмазенко, Э. А. Научно-технический отчет по договору № 910533 «Создание аппаратно-программного комплекса обслуживания экипажем систем жизнеобеспечения и обеспечения теплового режима»: Шифр ОКР «Имитатор» / Э. А. Курмазенко, Н. Н. Хабаровский, Г. Р. Камалетдинова. – Москва : НИИхиммаш, 2007. – 59 с.

30. Курмазенко, Э. А. Аппаратно-программный комплекс обслуживания экипажем систем эксплуатации регенерационных систем жизнеобеспечения: формирование и локализация нештатных ситуаций / Э. А. Курмазенко, Н. Н. Хабаровский, Г. Р. Камалетдинова // Тезисы докладов Международной конференции «Системы жизнеобеспечения как способ освоения человеком дальнего космоса». – Москва : ГНЦ РФ - ИМБП РАН, 2008.

31. Малоземов, В. В. Тепловой режим космических аппаратов / В. В. Малоземов. – Москва: Машиностроение, 1980.

32. Малоземов, В. В. Системы терморегулирования космических аппаратов / В. В. Малоземов, Н. С. Кудрявцева. – Москва: Машиностроение, 1995.

33. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / под ред. Г. И. Петрова. – Москва : Машиностроение, 1971. – 380 с.

34. Наумов, В. А. Катализ и регенерация газовой среды в космонавтике: Ч. 1, 2 / В. А. Наумов. – Москва : Логос, 2004 (ЗАО Астра семь). – 606 с.

35. Наумов, В. А. Определение кинематических параметров реакции Сабатье на никелевом катализаторе по критическим условиям воспламенения / В. А. Наумов, Л. И. Гаврилов // Кинетика и катализ. – 1979. – Т. 20. – С. 1581–1584.

36. Научные чтения по авиации и космонавтике 1979-1980. Системы обеспечения жизнедеятельности и безопасности экипажей летательных аппаратов / под ред. В. Н. Правецкого [и др.] – Москва: Академия наук СССР. Институт проблем механики, 1983. – 222 с.

37. Носов, Д. А. Оценка параметров моделирования неизотермических каталитических реакторов / Д. А. Носов // Математическое моделирование при проектировании систем обеспечения жизнедеятельности и безопасности экипажей летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Москва : МАИ, 1984. – 74 с. : ил.
38. Поршаков, Б. П. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности) / Б. П. Поршаков, Р.Н. Бикчентай, Б. А. Романов. – Москва : Недра, 1987. – 349 с.
39. Правецкий, В. Н. Некоторые проблемы создания систем обеспечения жизнедеятельности и безопасности экипажей летательных аппаратов / В. Н. Правецкий, Н. М. Самсонов, Р. И. Утямышев, Э. А. Курмазенко // Фундаментальные науки – медицине. Совместная сессия Общего собрания АН СССР и АМН СССР 19-20 ноября 1981 г. – Москва : Наука, 1981. – С. 257–266.
40. Проектирование и испытание систем обеспечения жизнедеятельности для космических станций. – Москва : ГОНТИ-4, 1974. – 144 с.
41. Пилотируемая экспедиция на Марс / под ред. А. С. Коротеева. – Москва : Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006. – 320 с.
42. Разработка катализатора гидрирования диоксида углерода : отчет о НИР, ИНВ №4562 / рук. темы Н. В. Мальцева. – АО Кристалл.
43. Романов, С. Ю. Системы жизнеобеспечения орбитальной станции «Мир» и Международной космической станции / С. Ю. Романов, И. П. Абрамов, Н. М. Самсонов [и др.] // Известия РАН, Серия Энергетика. – 2003. – № 3 – С. 33–52.
44. Российские планы Марсианской экспедиции // Новости космонавтики. – 2002. – №10.
45. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1977.
46. Слинько, М. Г. Моделирование реакторов с неподвижным слоем катализатора / М. Г. Слинько, В. В. Дильман, Б. М. Маркеев, А. Е. Кронберс // Химическая промышленность. – 1980. – №11. – С.186.
47. Сорокин, А.Е. Оценка эффективности регенерационной системы жизнеобеспечения межпланетных пилотируемых аппаратов / А. Е. Сорокин,

Э. А. Курмазенко, О. В. Кирюшин, А. А. Кочетков [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – № 2 (35). – С. 99-113.

48. Строгалев, В. П. Имитационное моделирование / В. П. Строгалев, И. О. Толкачева. – Москва : МГТУ им. Баумана, 2008. – С. 697–737.

49. Хемди, А. Таха. Введение в исследование операций / Хемди А. Таха ; Пер. с англ. и ред. А. А. Минько. – 7-е изд. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2005. – С. 697–737.

50. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – Москва : Мир, 1978. – 420 с.

51. Шибанов, Г. П. Обитаемость космоса и безопасность пребывания в нем человека / Г. П. Шибанов. – Москва : Машиностроение, 2007. – 543 с.

52. Asuka, Shima. Development of CO₂ Reduction System for Closed-Loop Air Revitalization System / Asuka Shima, Masato Sakurai, Shoichi Yoshihara, Mitsuru Ohnishi // AIAA 2011-5014. – 2011. – 6 p.

53. Czupalla, M. The Virtual Habitat – A Tool for Dynamic Life Support System Simulations / M. Czupalla, A. Zhukov, J. Schnaitmann, T. Bickel, U. Walter // AIAA 2010-6016. – 2010. – 12 p.

54. Darren, J. Samplatsky. Development and Integration of the Flight Sabatier Assembly on the ISS / Darren J. Samplatsky, Kevin Grohs // AIAA 2011-5151. – 2011. – 9 p.

55. Gökhan, Alptekin. Advanced CO₂ Removal and Reduction System / Gökhan Alptekin, Robert Copeland, Sarah DeVoss, Jeffrey LindAn // SAE Technical Paper Series. – 2004. – # 2004-01-2445. – 6 p.

56. Eduard Kurmazenko. Life support system virtual simulators for Mars-500 ground-based experiment / Eduard Kurmazenko, Nikolay Khabarovskiy, Guzel Kamaletdinova, Evgeniy Demin, Boris Morukov // Biomedical science, engineering and technology/ edited by Dhanjoo N. Ghista. – 2012.

57. Harry, W. Jones. Safety Analysis of Carbon Dioxide Reduction Technologies / Harry W. Jones // AIAA 2011-5216. – 2011. – 16 p.

58. Harry, W. Jones. Reliability Analysis of Carbon Dioxide Reduction Systems / Harry W. Jones // AIAA 2011-5271. – 2011. – 10 p.
59. Harry, W. Jones. Comparison of Bioregenerative and Physical / Chemical Life Support Systems / Harry W. Jones // SAE Technical Paper Series. – 2006. – #2006-01-2082. – 16 p.
60. Karen, Murdoch. Sabatier Carbon Dioxide Reduction Assembly Development for Closed Loop Water Recovery / Karen Murdoch, Loel Goldblatt, Frederick Smith, Jay Perry // Conference on space habitation research and technology. – 2004. – 12 p.
61. Karen, Murdoch. Integrated evaluation of closed loop air revitalization system components / Karen Murdoch // Conference Paper. – 2010. – NASA/CR-2010-216451. – 204 p.
62. Kurmazenko, E. A. Space Ecological/Engineering System for The Manned Interplanetary Vehicles Crew: Status and Key Technologies for its Development / E. A. Kurmazenko, L. I. Gavrilov, A. A. Kochetkov, N. N. Khabarovskiy // Proceedings of 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Republic of Korea. – 2009. – 12 p., (DVD). – Загл. с контейнера.
63. Michael, Swickarth. The development of models for carbon dioxide reduction technologies for spacecraft air revitalization / Michael Swickarth, Molly Anderson // AIAA 2012-3586. – 2012. – 19 p.
64. Paul, Spence. Non-Thermal Plasma Recovery of Hydrogen from Sabatier Waste Methane / Paul Spence, Ashwin Balasubramanian // AIAA 2011-5036. – 2011. – 9 p.
65. Richard R. Wheeler, Jr. Advanced Plasma Pyrolysis Assembly (PPA) Reactor and Process Development / Richard R. Wheeler, Jr., Neal M. Hadley, Roger W. Dahl // SAE Technical Paper Series. – 2012. – # 2012-3553. – 11 p.
66. Sakurai, Masato. Air Revitalization Technologies for Manned Long Term Exploration Aim to ISS Demonstration / Sakurai Masato, Shima Asuka, Sone Tomotsugu, Oguchi Mitsuo, Ohnishi Mitsuru, Tachihara Satoru, Satoh Naoki // Proceedings of 62

International Astronautical Congress, Cape Town, South Africa. – 2011. – 5 p., (DVD).
– Загл. с контейнера.

67. Samsonov, N. M. An Efficiency of Technologies and A Strategy for Synthesis of Integrated Life Support System Structure / N. M. Samsonov, E. A. Kurmazenko, N. S. Farafonov, E. V. Menkin // SAE Technical Paper Series. – 2000. – # 2000-01-2396. – 8 p.

68. Sorokin, A. E. Air environment of manned space stations (equipment, quality) / A. E. Sorokin, Y. Vasin, L. Stroganova // Proceedings of International Conference on Innovative Technologies (IN-TECH 2018), Zagreb. – 2018. – p. 195-198.

69. Sorokin, A. E. Manned mars mission risks evaluation / A. E. Sorokin, L. Bettiol, A. De La Torre [etc.] // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. – 2018.

70. Sorokin, A. E. Creating an Atmosphere within Spacecraft / A. E. Sorokin, L. B. Stroganova, Y. A. Vasin, A. E. Belyavskii // Russian Engineering Research. – 2019. – 39(9). – C. 813-815.

71. Witt, J. ACLS – Europe's Closed Loop Air Revitalisation System / Witt J., Hovland S., Bockstahler K. // AIAA Technical Paper Series. – 2010. – # 2010-6232. – 4 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Внешний вид испытательного стенда и основные технические
характеристики**

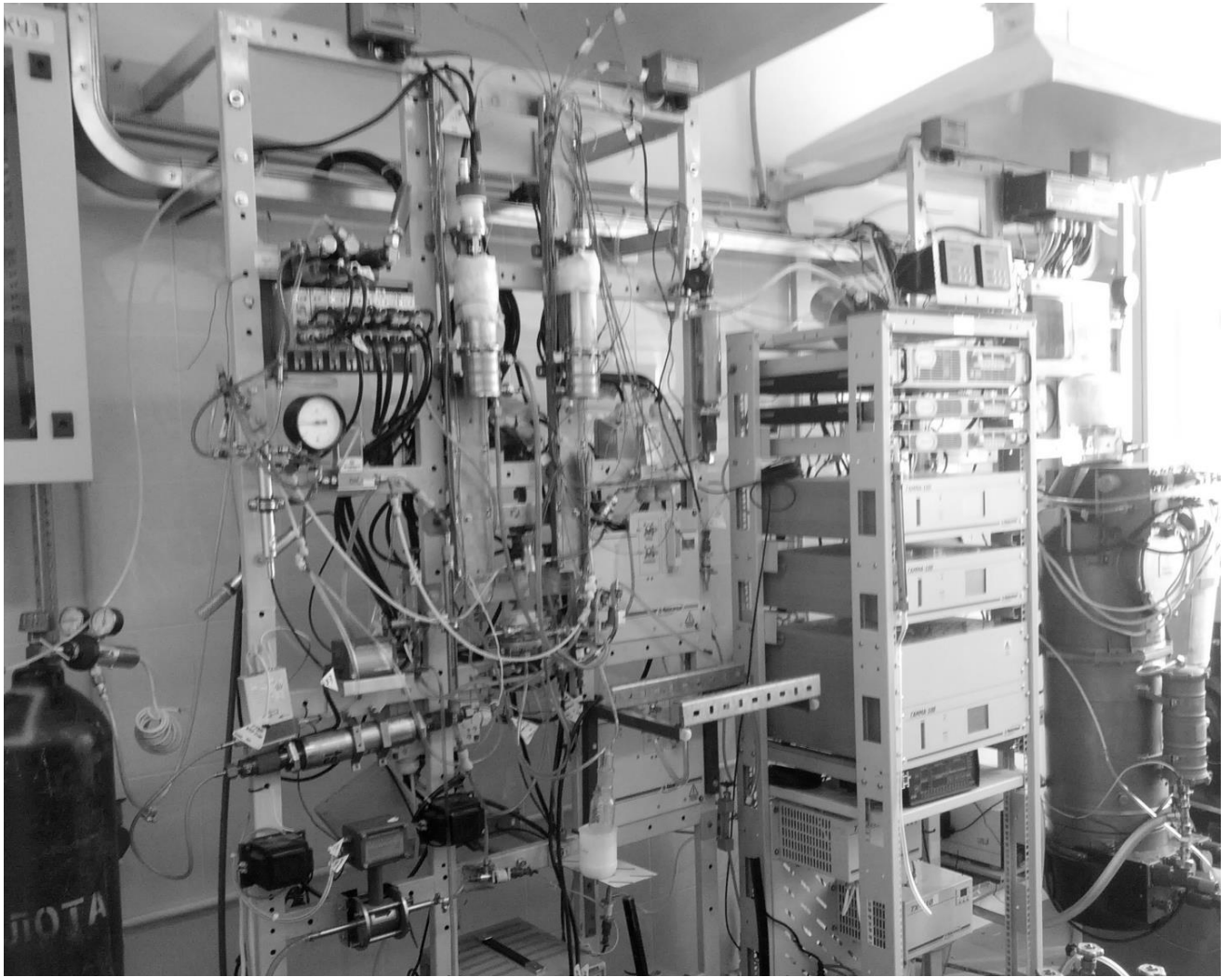


Рисунок А.1 – Внешний вид испытательного стенда

Таблица А.1 – Основные технические характеристики испытательного стенда

Наименование параметра		Значение
1 Характеристика электропитания, потребляемого технологическим оборудованием стенда:		
1.1 Ток - переменный:	напряжение, В	220 и 380
	мощность, Вт	до 3
2 Характеристика электропитания, потребляемого оборудованием блока гидрирования (реактора, агрегатов, арматуры и т.д.)		
2.1 Постоянный ток:	напряжение, В	От 26 до 29
	мощность, кВт	до 2
2.2 Переменный ток:	напряжение, В	220
	мощность, кВт, не более	0,6
3 Характеристика теплоносителя контура системы терморегулирования		
3.1 Расход теплоносителя системы терморегулирования, л/ч, не более		40
3.2 Рабочая температура теплоносителя системы терморегулирования, °С		15±10
3.3 Рабочее давление теплоносителя системы терморегулирования, МПа		От 0,05 до 0,50
3.4 Сброс тепловой энергии в контур, Вт, не более		700
4 Показатели воздуха в помещении (в любых сочетаниях):		
4.1 Температура, °С		От плюс 18 до плюс 30
4.2 Относительная влажность, %		От 30 до 90
5 Расход диоксида углерода, л/ч		От 24 до 80
6 Концентрация диоксида углерода на входе в БГДУ, % об.		99
7 Расход водорода, л/ч		От 80 до 400
8 Содержание кислорода в водороде, % об., не более		2
9 Содержание аэрозоли КОН в водороде, мг/м ³ , не более		2
10 Температура поступающего водорода, °С		20±10
11 Давление поступающего водорода, кПа, не более		135
12 Влажосодержание метана на выходе из БГДУ, г/м ³		до 10
13 Температура на поверхности агрегатов, °С, не более		40
14 Габариты, мм		3000x2300x800
15 Масса, кг		800

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Принципиальная схема испытательного стенда

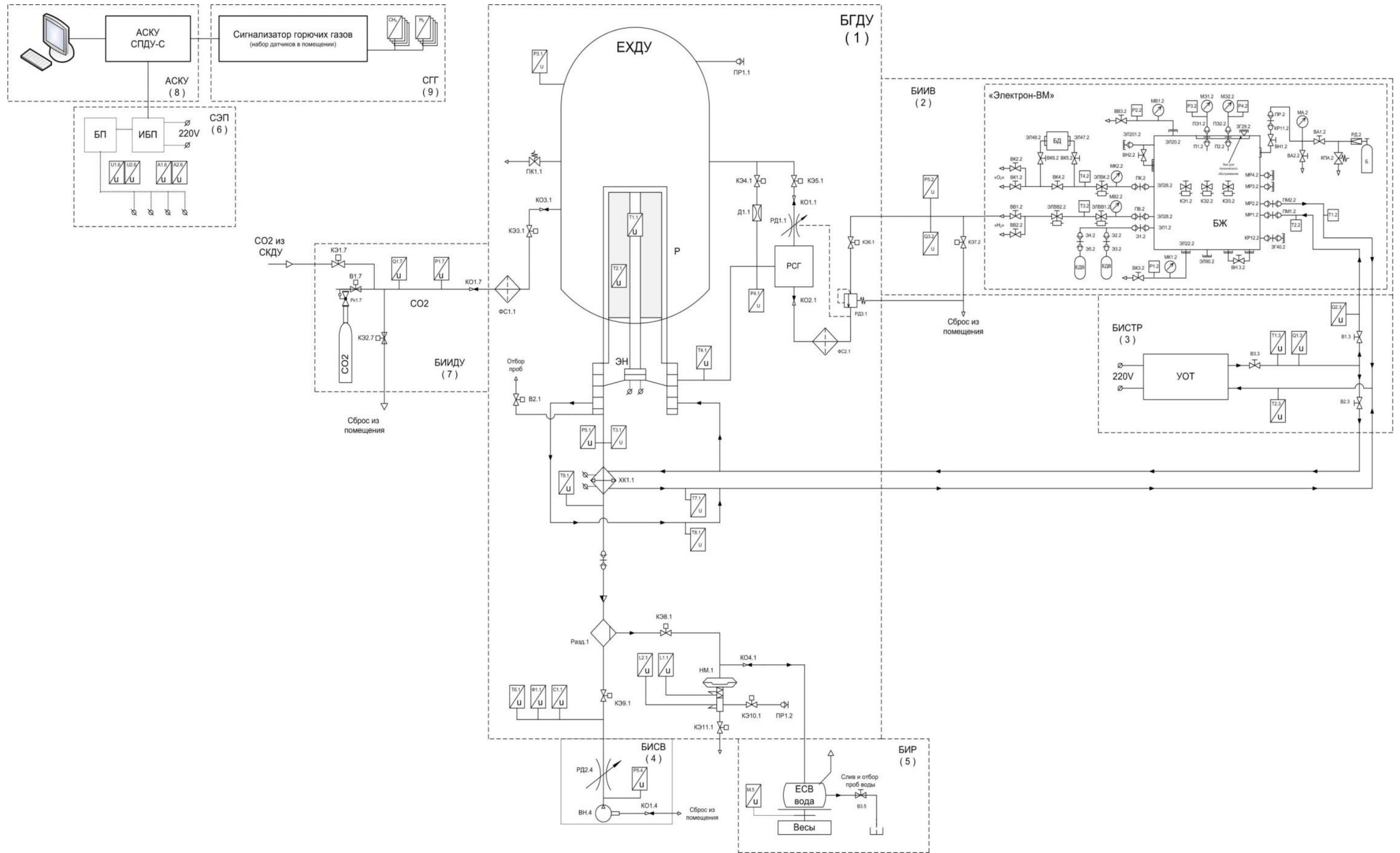


Рисунок Б.1 – Схема испытательного стенда комбинированная принципиальная

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Контрольно-измерительное оборудование испытательного стенда

Таблица В.1 – Перечень контрольно-измерительного оборудования испытательного стенда

Позиция на схеме 10597.6901.10.000 С3	Наименование оборудования	Кол- во	Пределы измерений	Погреш- ность, %
P4.1	Датчик давления Метран-55-ДИВ-535-МП-Т1-050-0,15МПа-42-М20	1	от 0 до 0,15 МПа	±0,5
Ф1.1	Датчик влажности газовой смеси после разделителя ИПВТ-7/8	1	от 0 до 100 %	±2
С1.1	Газоанализатор СН ₄ , СО ₂ , Н ₂ ГАММА-100 ИБЯЛ 413251.001-06	1	от 0 до 100 %	±5
МА.2	Мановакуумметр МТИ (-1...+3) кгс/см ² ГОСТ 2405-88	1	от -1 до +3 кгс/см ²	±1
МВ1.2, МК1.2	Манометр МТИ(0+1) кгс/см ² ГОСТ 2405-88	2	от 0 до 1 кгс/см ²	±1
T5.2	Датчик температуры ЧЭПТ-2-100ПВ-4-22 ТУ 4211-900-17113168-95	1	от 196 до 300 °С	±2
T1.2...T4.2	Датчик температуры ЧЭПТ-2-100ПВ-4-22 ТУ4211-900-17113168-95	4	от 196 до 300 °С	±2
P3.2, P4.2	Датчик давления МЕТРАН-55-ДИ-518-МП-Т1-015-0,10МПа-42-М20	2	от 0 до 0,10 МПа	±0,15
P1.2	Датчик давления МЕТРАН-55-ДИ-518-МП-Т1-015-0,25МПа-42-М20	1	от 0 до 0,25 МПа	±0,15
P2.2	Датчик давления МЕТРАН-55-ДИВ-535-МП-Т1-050-0,15МПа-42-М20	1	от 0 до 0,15 МПа	±0,5
P5.2	Датчик давления МЕТРАН-55-ДА-505-МП-Т1-015-0,25МПа-42-М20	1	от 0 до 0,25 МПа	±0,15
МЭ1.2, МЭ2.2	Мановакуумметр МТИ {-1...+3) кгс/см ² ГОСТ 2405-88	2	от -1 до +3 кгс/см ²	±1
Q3.2	Датчик расхода Н ₂ El-flow F111В-10К-МGD-33-V	1	от 8 до 420 л/час	±0,5
T1.3, T2.3	Датчик температуры ЧЭПТ-2-100-В-4-27	2	от 196 до 300 °С	±2
Q1.3, Q2.3	Датчик расхода «Взлет ТЭР»	2	от 0,085 до 2,8 м ³ /час от 0,015 до 0,8 м ³ /час	±0,35 ±0,15

Позиция на схеме 10597.6901.10.000 СЗ	Наименование оборудования	Кол- во	Пределы измерений	Погреш- ность, %
P5.4	Датчик давления МЕТРАН-55-ДМП-331 и 111-9999 (0...120кПа)-1-1-100	1	от 0 до 120 кПа	±0,5
Весы	Весы лабораторные VM5101 ООО «ОКБ Веста»	1	от 0 до 30 кг	±0,007
P1.7	Датчик давления МЕТРАН-55-ДИ-515-МП-Т1-050-0,4 МПа-42-М20	1	от 0 до 0,4 МПа	±0,5
Q1.7	Датчик расхода CO ₂ РРГ-12	1	от 0 до 360 л/час	±1,5

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Иерархия подпрограмм

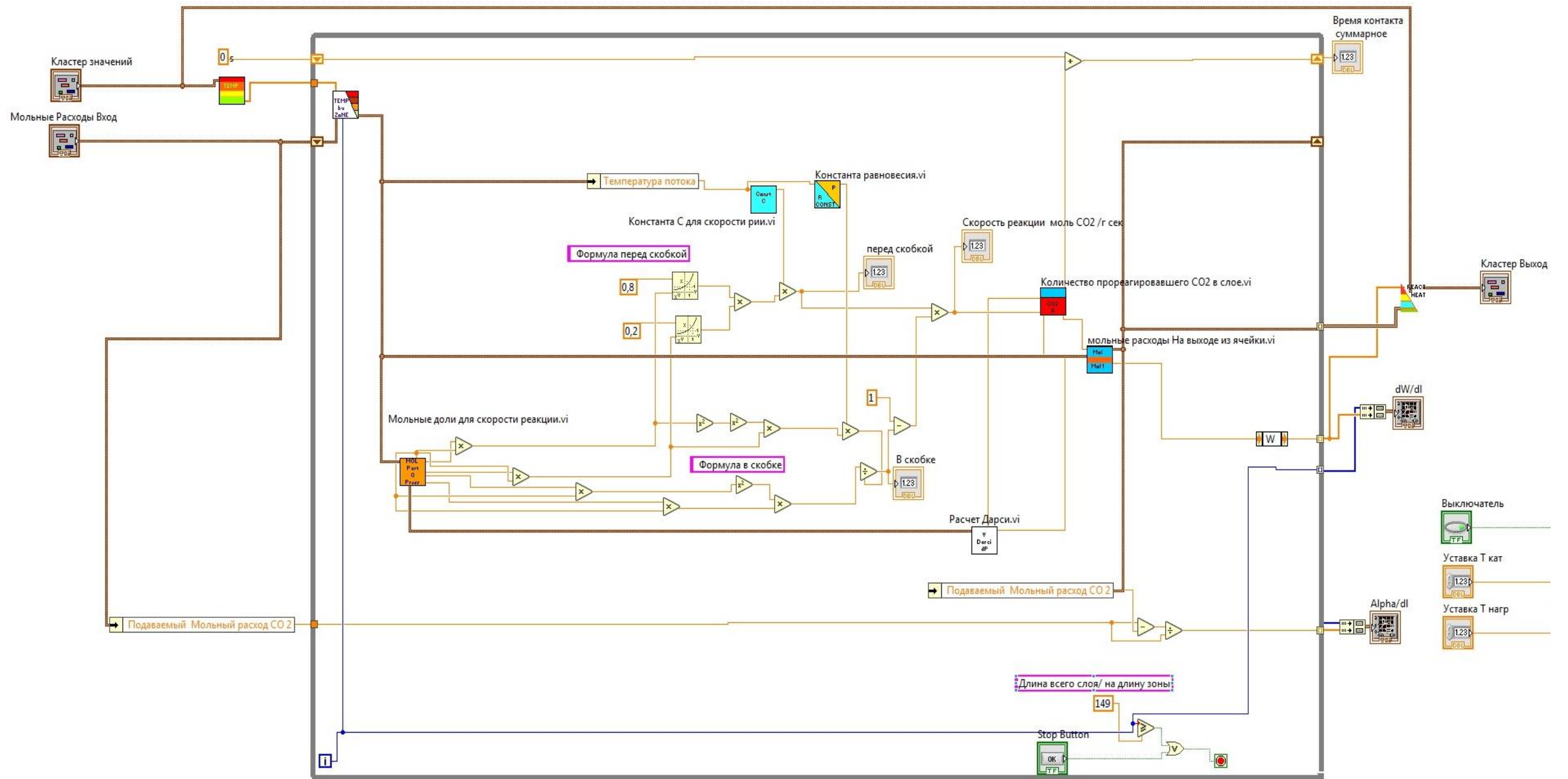


Рисунок Г.1 – Иерархия подпрограмм

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акты об использовании результатов исследований



Акт

**о внедрении результатов диссертационной работы Когана И.Л.
 «Методика выбора параметров неизотермического каталитического реактора
 гидрирования межпланетного пилотируемого аппарата на основе имитационных
 математических моделей»**

Результаты диссертационной работы начальника лаборатории И.Л. Когана по теме «Методика выбора параметров неизотермического каталитического реактора гидрирования межпланетного пилотируемого аппарата на основе имитационных математических моделей» по специальности: 05.07.02 - проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов были использованы компанией АО «НИИХиммаш» при выполнении работ по теме «СПДУ»: разделы 1.1 и 1.4 эскизного проекта; раздел 3 технического проекта. Основываясь на предложенной в работе методике были определены конструктивные параметры реактора гидрирования 10628.6988.000 и технологические аспекты проведения процесса гидрирования диоксида углерода с образованием метана и воды. В результате, разработанный и изготовленный реактор показал хорошую производительность, удовлетворяющую требованиям заказчика, что подтверждает положения, выдвинутые в методике и ценность данной работы в организации производственного процесса.

Председатель комиссии

Главный конструктор

А.А. Кочетков

Члены комиссии:

Зам. Генерального директора, к.т.н.

П.А. Харин

Начальник отдела, д.т.н., профессор

Л.С. Бобе

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

Козорез Д.А.

«21» декабря 2020 г.

АКТ

о внедрении кандидатской диссертационной работы Когана Иоанна Лазаревича


в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» 614 «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасность жизнедеятельности».


Настоящим актом подтверждается использование результатов, полученных в диссертационной работе Когана И.Л. «Методика выбора параметров неизотермического каталитического реактора гидрирования межпланетного пилотируемого аппарата на основе имитационных математических моделей», при реализации учебных программ магистратуры по направлению 24.04.01 «Ракетные комплексы и космонавтика» в курсе «Системы жизнеобеспечения и аварийного спасения экипажа ЛА».

Выводы и рекомендации диссертационной работы применяются при реализации основной образовательной программы высшего образования (уровень: специалитет) по направлению 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов», профили: «Системы регенерации среды обитания», «Расчет и конструирование аппаратов обеспечения жизнедеятельности» при чтении лекций и использованы в курсовом и дипломном проектировании.

И.о. Директора дирекции Института №6
«Аэрокосмический»,
к.т.н., доцент

Заведующий кафедрой 614
к.э.н., доцент


А.А. Ермаков


А.Е. Сорокин