

На правах рукописи



Коган Иоанн Лазаревич

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

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство
летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель	к.э.н., доцент, заведующий кафедрой «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасности жизнедеятельности» МАИ Сорокин Андрей Евгениевич
Официальные оппоненты:	Крючков Борис Иванович, д.т.н., федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина», главный научный сотрудник Беркович Юлий Александрович, д.т.н., профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки, государственный научный центр Российской Федерации - «Институт медико-биологических проблем российской академии наук» (ГНЦ ИМБП РАН), заведующий лабораторией
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил» Министерства обороны Российской Федерации.

Защита диссертации состоится «10» июня 2021 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д212.125.10, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по ссылке: <https://mai.ru/events/defence>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.125.10
к.т.н., доцент



Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В перечне критических технологий Российской космической программы регенерационные системы жизнеобеспечения занимают одно из приоритетных мест и определяют потенциальные возможности освоения человеком дальнего космоса.

Введение в технологическую структуру интегрированной регенеративной системы жизнеобеспечения (ИРСЖО) блока переработки выдыхаемого экипажем углекислого газа позволяет увеличить степень замкнутости эколого-технической системы (ЭТС) по воде, тем самым сократить объемы запасов и, соответственно, уменьшить стартовую массу межпланетного пилотируемого аппарата (МПА). Экономия полезной нагрузки за время 1000-суточной миссии составит порядка 3500 кг для экипажа из 6 человек, что является особенно актуальным в условиях крайне ограниченной стартовой массы космического аппарата (КА). Аналогичные системы активно разрабатываются ведущими иностранными космическими агентствами:

- NASA провело летные испытания системы на борту Международной космической станции, в настоящее время создает доработанную версию;
- ESA установило систему на МКС и планирует проведение испытаний на ближайшее время;
- JAXA проводит наземные испытания.

В условиях жесткой ограниченности массы и объема КА основным принципом построения систем обеспечения жизни и деятельности экипажа становится восстановление необходимых экипажу веществ из продуктов жизнедеятельности. Обеспечение экипажа кислородом неразрывно связано с его регенерацией из выдыхаемого углекислого газа, что осуществимо по реакции Сабатье - каталитического гидрирования диоксида углерода с образованием метана и воды, которая снова может быть использована для получения кислорода электролизом.

Результаты анализа источников научно-технической информации показывают, что отсутствуют методологические основы выбора проектно-конструкторских параметров неизотермического каталитического реактора, изложенные в виде алгоритма, позволяющие разработать реактор, обладающий максимальной производительностью и надежностью исходя из программы космической миссии.

Степень разработанности темы исследования.

Существует ряд исследований, посвященных созданию блоков реакционной аппаратуры для проведения реакции гидрирования диоксида углерода. Приведенные в них математические модели с различными степенями упрощения описывающие процессы, происходящие в реакторе, имеют основное допущение в виде изотермичности реактора. Однако, подобный подход не позволяет создать конструкцию реактора, обеспечивающую его устойчивую работу в

автотермическом режиме, не требующем дополнительных затрат энергии на поддержание процесса. Отсутствуют методики проектирования, учитывающие интерфейсы со вспомогательными агрегатами и служебными бортовыми системами.

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 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.

Объект исследования – блок гидрирования диоксида углерода как часть системы жизнеобеспечения экипажа космического аппарата.

Предмет исследования – методологические основы выбора проектно-конструкторских параметров неизотермического каталитического реактора, обеспечивающих его функционирование в автотермическом режиме, и вспомогательного оборудования блока гидрирования диоксида углерода.

Научная новизна исследования.

Научную новизну работы определяют:

- имитационная модель для выбора проектно-конструктивных параметров градиентного реактора гидрирования с односторонним рекуператором на основе «ячеичной» 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 составляет разработанная 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.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследований имеющихся и разработанных образцов блоков реакционных аппаратов.
2. Обобщенная методика выбора проектно-конструкторских параметров блока гидрирования с неизотермическим реактором.
3. Экспериментальные данные, полученные на основе натуральных и компьютерных экспериментов.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается строгой постановкой задачи исследования, четкой формулировкой применяемых формализованных описаний, результатами программной реализации и хорошей сходимостью результатов экспериментов на модели с данными, полученными в ходе натуральных экспериментов на разработанных образцах блоков реакционной аппаратуры.

Промежуточные результаты работы многократно апробированы, путем обсуждения с ведущими специалистами в данной отрасли на различных конференциях, и защитой этапов эскизного и технического проектов.

Результаты обсуждались на следующих конференциях и заседаниях: 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2014» – г. Москва, 17-21 ноября 2014 г.; XX научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, 10-14 ноября 2014 г. в ОАО РКК «Энергия» г. Королев, Московская обл.; XX международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» – Евпатория, 28 июня-5 июля 2015 г.; 66th International Astronautical congress – Jerusalem Israel 2016; XXI международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» – Евпатория, 3-10 июля 2016 г.; «Авиакосмическая и экологическая медицина» XVI Конференция по космической биологии и медицине с международным участием – Москва, 5-8 декабря 2016 г.; XXI Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов в РКК «Энергия» – г. Королев, Московская обл., 30 октября-3 ноября 2017 г.; XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» – Евпатория, 2-9 июля 2017 г.; Научно-практическая конференция «Технологии жизнеобеспечения и техносферной безопасности человека» – Тамбов, 25 сентября 2018 г.; 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика-2018» - Москва, МАИ 19-23 ноября 2018 г.; XIII международная

научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос» – Звездный городок, Московская обл., 13-15 ноября 2019 г.; Научно-технический совет АО «НИИХиммаш» 2014-19 гг., заседания кафедры «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасности жизнедеятельности» МАИ.

Внедрение результатов работы.

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 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.

Публикации.

По материалам диссертации опубликованы 22 работы, отражающие основные положения исследования, в том числе 5 статей в ведущих научных изданиях, включенных в перечень ВАК и международные системы цитирования Web of Science и Scopus, 2 технических отчета.

Личный вклад автора.

Формулировка цели и задач исследования, обобщенная методика выбора проектно-конструкторских параметров неизотермического каталитического реактора, проведение экспериментальных исследований и статистическая обработка полученных данных осуществлены самостоятельно автором.

Структура и объем работы.

Диссертация объемом 117 страниц включает в себя введение, 4 главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 67 наименований, 4 приложения. В работе содержится 63 рисунка и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и основные положения, представляемые к защите, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов исследования.

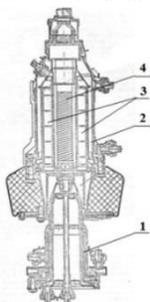
В первой главе приведены результаты аналитического обзора источников научно-технической информации по теме диссертации. Рассмотрены различные технологии переработки диоксида углерода и показано на основе многокритериального анализа, что реакция Сабатье является приоритетной, как наиболее изученная и отработанная на практике. Приведены примеры применения данной технологии в системах жизнеобеспечения, разработанных иностранными космическими агентствами NASA, ESA, JAXA, показаны конструкции реакторов, требования к катализаторам и их характеристики.

Рассмотрены термодинамические закономерности реакции Сабатье и подтверждена возможность устойчивого протекания реакции в автотермическом режиме.

Приведены результаты анализа математических моделей, используемых при выборе проектно-конструкторских параметров реактора.

На основе результатов анализа сформулирована общая постановка задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты предварительного экспериментально-теоретического анализа трех типов каталитических реакторов, изготовленных ранее для системы переработки диоксида углерода орбитальной станции «Мир», на различных катализаторах и соотношениях исходных реагентов (рисунок 1).

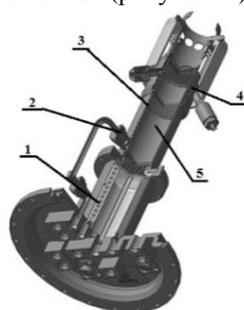


1 – конденсатор; 2 – зазор;
3 – рекуперативный
теплообменник; 4 – слой
катализатора

a



б



1 – конденсатор; 2 – зазор;
3 – рекуперативный
теплообменник; 4,5 – слой
катализаторов

в

Рисунок 1 – Конструкции ранее изготовленных каталитических реакторов:
a – «Вулкан», *б* – «Спрут», *в* – СПДУ (вариант 1)

Для проведения натурных экспериментов разработан экспериментальный испытательный стенд, структурная схема которого приведена на рисунке 2.

Разработка системы переработки диоксида углерода в НИИХиммаш`е проводилась до 1996 года, но была заморожена из-за проблем с разработкой системы концентрирования диоксида углерода, выделяющей из атмосферы объекта CO_2 с чистотой не ниже 96%.

После возобновления работ изготовлен блок гидрирования (вариант 1). Реактор располагался внутри емкости, заполненной диоксидом углерода под избыточным давлением, одновременно служащей накопителем для согласования с циклически работающей системой концентрирования, а также выполняющей роль теплоизоляции и гарантирующей невозможность утечки горючих газов в атмосферу.

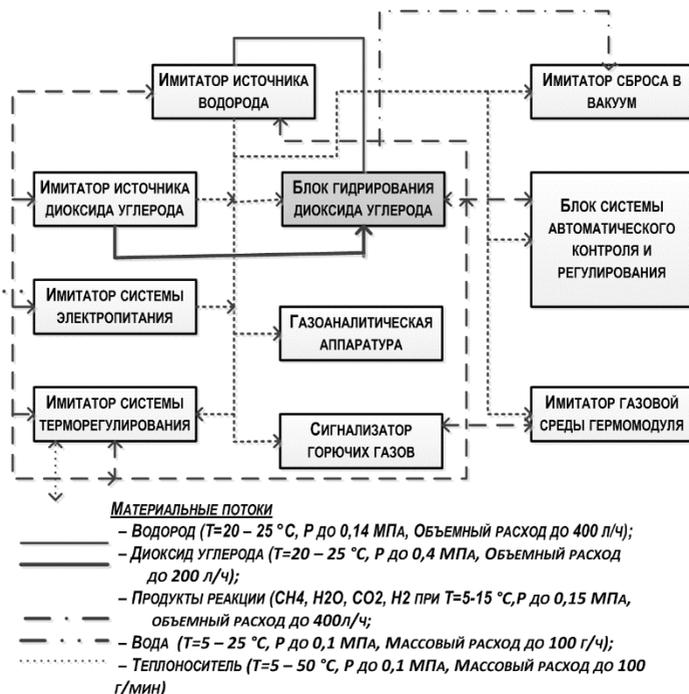


Рисунок 2 – Структурная схема испытательного стенда

Нагрев реактора осуществлялся внешним кольцевым электронагревателем. Рекуператор располагался на наружной стенке полости с катализатором. Конструкция реактора позволяла многократно менять катализатор, в качестве которого поочередно испытывались: рутениевый катализатор на основе из оксида алюминия 5P-НС-1; рутениевый катализатор на смешанной основе из диоксида титана и оксида алюминия 5P-НС-2; никель-хромовый катализатор НХА.

Спроектированный блок гидрирования (вариант 1) не обеспечивал поддержание устойчивого проведения реакции в автотермическом режиме при малых расходах реагентов, и требовался циклический подогрев катализатора для поддержания реакции. Лишь на расходах водорода/диоксида углерода более 240/60 л/час обеспечивалось стабильное течение реакции без подвода внешнего тепла, при этом производительность по воде не превышала 72% (рисунок 3). При этих условиях отвод тепла с поверхности реактора слишком велик и зависит от давления газа в емкости.

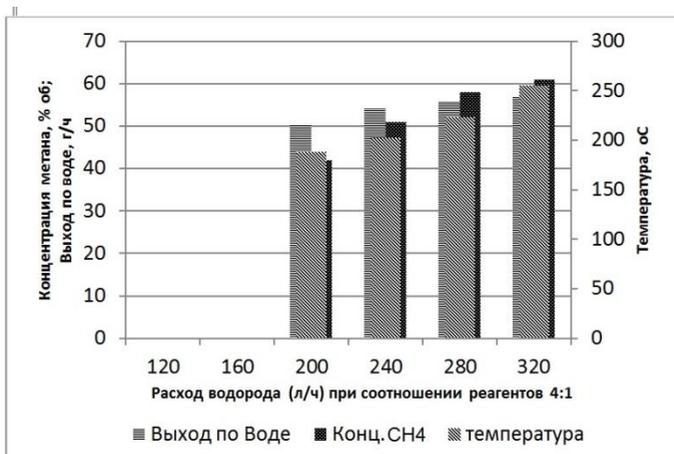


Рисунок 3 – Параметры процесса при различных расходах реагентов (реактор без теплоизоляции, давление в реакторе 250 кПа, автотермический режим не достигнут при расходах водорода 120 и 160 нл/ч, приведенный выход по воде к номинальному режиму 160/40 нл/час)

Поэтому реактор гидрирования был извлечен из емкости и изолирован теплоизолирующими матами из кремнеземного волокна ТМК-2, что уменьшило потери тепла в окружающую среду и увеличило температуру катализатора и производительность, и привело к расширению границ автотермического режима в сторону низких расходов реагентов (рисунок 4).

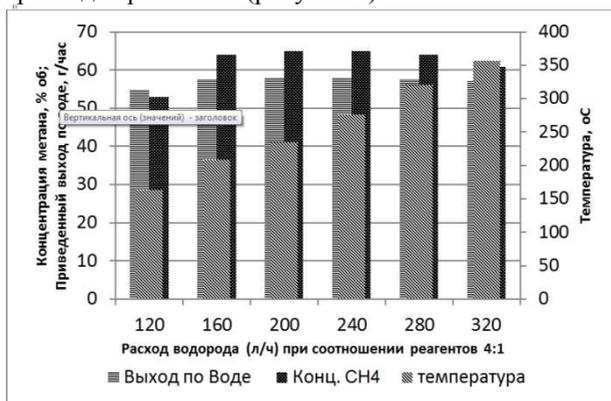


Рисунок 4 – Параметры процесса при различных расходах реагентов (реактор с теплоизоляцией, приведенный выход по воде к номинальному режиму 160/40 нл/час)

Результаты экспериментов по оценке влияния свойств катализатора на параметры реакции, проведенные на трех катализаторах:

- рутениевый катализатор 5P-НС-1 на носителе Al_2O_3 ;
- рутениевый катализатор 5P-НС-2 на комбинированном носителе: Al_2O_3 с 30 % мас. TiO_2 ;
- хромовый катализатор НХА,

показали, что применение катализаторов 5P-НС-1 и 5P-НС-2 приводит к сопоставимым результатам при небольшом снижении температуры проведения процесса на катализаторе 5P-НС-2, вследствие увеличения эффективной теплопроводности (рисунок 5).

Хромовый катализатор НХА имеет лучшие характеристики в области высоких температур, однако требует периодического проведения активации водородом.

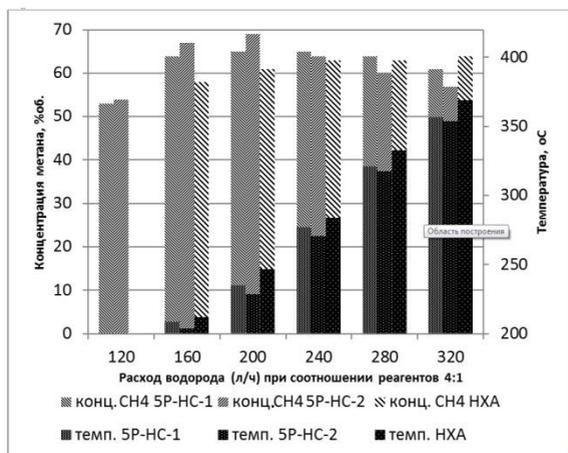


Рисунок 5 – Производительность (по метану) на разных типах катализатора

Результаты предварительно проведенного экспериментально-теоретического анализа показали, что для получения наиболее полной информации необходимо продолжить проведение исследований тепловых режимов блока реакционной аппаратуры в двух направлениях:

- 1) создание имитационной модели для исследования процессов тепло- и массообмена в компьютерных экспериментах;
- 2) разработки новой конструкции на основе полученных результатов с целью верификации имитационной модели и проведения натуральных экспериментов.

В третьей главе рассмотрены вопросы создания имитационной модели реактора гидрирования.

На рисунке 6 приведена расчетная схема реактора, принятая при формировании формализованного описания.

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

При разработке формализованного описания приняты следующие основные допущения:

- процессы тепло- и массопереноса описываются нелинейными уравнениями материального и энергетического балансов;
- гидродинамическая структура потоков описывается «ячеечной моделью», в которой каждая последовательно соединенная ячейка представляет собой «реактор идеального перемешивания»;
- скорость течения в реакционной зоне определяется законом Дарси в форме

$$v = \frac{-k \, dP}{\mu \, dl}, \quad (1)$$

где k – проницаемость слоя катализатора, определяемая по зависимости для сферических гранул

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

μ – динамическая вязкость, определяемая по методу Саттерленда

$$\left. \begin{aligned} \mu_{с м} &= \frac{\sum_{j=1}^{j=4} (\mu_j n_j \sqrt{M_{\mu j}})}{(n_j \sqrt{M_{\mu j}})} \\ \mu_j(T) &= \mu_j(T_0) \sqrt{\frac{T}{T_0}} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

P – давление на входе в отдельную ячейку; ϵ – пористость; d_s – диаметр сферических гранул катализатора; μ_j , $\mu_{с м}$ – 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.

- смесь исходных компонентов и продуктов реакции подчиняется законам идеальных газов;
- теплофизические параметры смеси являются функциями температуры и химического состава;

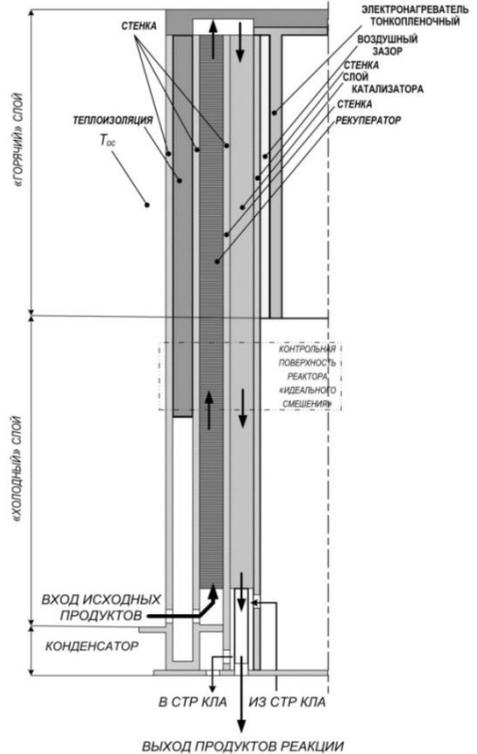


Рисунок 6 – Расчетная схема реактора гидрирования

– разделяющие металлические стенки рассматриваются как «тонкие».

Система уравнений материального баланса для i -й ячейки может быть записана в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_{CO_2}}{d\tau} &= \frac{Q_{CO_2}}{\epsilon V_{i,CO_2}} (C'_{CO_2} - C''_{CO_2}) \\ \frac{dC_{H_2}}{d\tau} &= \frac{Q_{H_2}}{\epsilon V_{i,H_2}} (C'_{H_2} - C''_{H_2}) \\ \frac{dC_{CH_4}}{d\tau} &= \frac{Q_{CH_4}}{\epsilon V_{i,CH_4}} (C'_{CH_4} - C''_{CH_4}) \\ \frac{dC_{H_2O}}{d\tau} &= \frac{Q_{H_2O}}{\epsilon V_{i,H_2O}} (C'_{H_2O} - C''_{H_2O}) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $Q_{CO_2}, Q_{H_2}, Q_{CH_4}, Q_{H_2O}$ – объемные расходы компонентов реакционной смеси; V_i – геометрический объем слоя катализатора ($V_i = L_i S_k$); верхние индексы «'» и «''» обозначают значения мольных концентраций реакционной смеси на входе в реакционную зону и выходе из нее, соответственно.

Кинетическое уравнение скорости химической реакции для рутениевого катализатора может быть записано в виде:

$$J = k_r P_{i,CO_2}^{0,2} P_{i,H_2}^{0,8} \left(1 - \frac{P_{i,CH_4} P_{i,H_2O}^2}{K_r P_{i,CO_2} P_{i,H_2}^4} \right), \quad (5)$$

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:

$$k_r = 4,26 \times 10^5 \exp(-12000/T\bar{R}), \quad (6)$$

где T – абсолютная температура; \bar{R} – универсальная газовая постоянная.

Константа равновесия K_r определяется зависимостью:

$$K_r = \exp \left[\frac{\lambda_1}{T^2} + \frac{\lambda_2}{T} + \lambda_3 \right], \quad (7)$$

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

Уравнения энергетического баланса для выделенных конструктивных элементов (рисунок 6) в i -й ячейке блока реакционной аппаратуры могут быть записаны в виде:

– для элемента ЭН – тонкопленочного электрического нагревателя

$$\frac{dT_{i,ЭН}}{d\tau} = \left\{ q_{i,ЭН} - \epsilon c_o \left[\left(\frac{T_{i,ЭН}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,CT1}}{100} \right)^4 \right] \right\} A_1^{ЭН} -$$

$$-\frac{\lambda_{i,KG}}{\delta_{i,KG}} A_1^C T_1 (T_{i,\text{ЭН}} - T_{i,C T_1}); \quad (8)$$

- для стенки СТ1, отделяющей катализатор от нагревателя

$$\frac{dT_{i,C T_1}}{dt} = \frac{\lambda_{i,KG}}{\delta_{i,KG}} A_1^C T_1 (T_{i,\text{ЭН}} - T_{i,C T_1}) + \varepsilon c_o A_1^{\text{ЭН}} \left[\left(\frac{T_{i,\text{ЭН}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i,C T_1}}{100} \right)^4 \right] - A_1^{KP} (T_{i,C T_1} - T_{i,KP}); \quad (9)$$

- для элемента КП – слоя катализатора

$$\frac{dT_{i,KP}}{dt} = A_1^{KP} (T_{i,C T_1} - T_{i,KP}) + A_r^{KP} (\sum_{j=1}^4 X_j) - A_2^{KP} (T_{i,KP} - T_{i,KPP}) - \rho_{i,KP} c_{p,i,KP} Q_{i,KP} (T'_{i,KP} - T''_{i,KP}); \quad (10)$$

- для элемента КПП – рекуперативного теплообменника

$$\frac{dT_{i,KPP}}{dt} = A_2^{KP} (T_{i,KP} - T_{i,KPP}) + \rho_{i,KPP} c_{p,i,KPP} Q_{i,KPP} (T''_{i,KPP} - T'_{i,KPP}) - A_1^{KPP} (T_{i,KPP} - T_{i,C T_3}); \quad (11)$$

- для элемента СТ3, отделяющей слой теплоизоляции от рекуператора

$$\frac{dT_{i,C T_3}}{dt} = A_1^{KPP} (T_{i,KPP} - T_{i,C T_3}) - A_1^C T_4 (T_{i,C T_3} - T_{i,C T_4}), \quad (12)$$

- для элемента СТ4, отделяющей слой теплоизоляции от внешней газовой среды

$$\frac{dT_{i,C T_4}}{dt} = A_1^C T_4 (T_{i,C T_3} - T_{i,C T_4}) - A_2^C T_4 (T_{i,C T_4} - T_{i,G.C.P.}), \quad (13)$$

В уравнениях (8)–(13) $A_1^{\text{ЭН}} = \frac{\pi L_i D_{\text{ЭН}}}{(c_{\text{ЭН}} \rho_{\text{п р ЭН}} V_{\text{ЭН}})_i}$; $A_1^C T_1 = \frac{\pi L_i D_{C T_1}}{(c_{C T_1} \rho_{C T_1} V_{C T_1})_i}$;

$$A_1^{KP} = \frac{\lambda_{i,CT_1}}{(\varepsilon \rho_{KP} c_{p,KP} V_{KP})_i \delta_{i,CT_1}} S_{i,CT_1}; \quad A_r^{KP} = \frac{J \dot{H}_r}{(\varepsilon \rho_{KP} c_{p,KP} + (1-\varepsilon) c_{\text{кат}} \rho_{\text{кат}})_i V_{i,KP}};$$

$$A_2^{KP} = \frac{k_{i,CT_2}}{(\varepsilon \rho_{KP} c_{p,KP} V_{KP})_i} S_{i,CT_2}; \quad k_{i,CT_2} = \frac{1}{\frac{\delta_{i,CT_2}}{\lambda_{i,CT_2}} + \frac{1}{\alpha_{i,KPP} \psi}}$$

$$A_1^{KPP} = \frac{k_{i,CT_3}}{(\rho_{KPP} c_{p,KPP} V_{KPP})_i} S_{i,CT_3}; \quad k_{i,CT_3} = \frac{1}{\frac{\delta_{i,CT_3}}{\lambda_{i,CT_3}} + \frac{1}{\alpha_{i,KPP} \psi}}$$

$$A_1^{CT_4} = \frac{\lambda_{i,ТПИ}}{(c_{CT_4} \rho_{CT_4} V_{CT_4})_i \delta_{i,ТПИ}} S_{i,CT_4}; \quad A_2^{CT_4} = \frac{\alpha_{Г,СР}}{(c_{CT_4} \rho_{CT_4} V_{CT_4})_i} S_{i,CT_4};$$

$q_{i,\text{ЭН}}$ – тепловой поток от электронагревателя в i -й ячейке [$\text{Дж/с} \cdot \text{м}^2$]; ε и c_o – степень черноты и постоянная Стефана-Больцмана; $\frac{\lambda_{i,KG}}{\delta_{i,KG}}$ – термическая проводимость зазора, отделяющего нагреватель от стенки (КГ – канал газовый); L_i – длина i -й ячейки; одинакова для всех элементов; $V_{\text{ЭН}}, D_{\text{ЭН}}, c_{\text{ЭН}}$ и $\rho_{\text{п р ЭН}}$ –

объем, диаметр, теплоемкость и приведенная плотность материала электронагревателя соответственно; V_{CT1} , D_{CT1} , c_{CT1} и ρ_{CT1} – объем, диаметр, теплоемкость и плотность материала стенки СТ1; $\frac{\lambda_{i,CT1}}{\delta_{i,CT1}}$ – термическая проводимость стенки СТ1; $S_{i,CT1}$ – площадь стенки СТ1; V_{KP} и ρ_{KP} – объем и плотность газа в слое катализатора; $C_{pi,KP}$ – теплоемкость газовой смеси в выделенной зоне слоя катализатора; \tilde{H}_r – тепловой эффект реакции; c_{KAT} и ρ_{KAT} – объем и плотность слоя катализатора; $S_{i,CT2}$ – площадь стенки СТ2; k_r – коэффициент теплопередачи; $\frac{\lambda_{i,CT2}}{\delta_{i,CT2}}$ – термическая проводимость стенки СТ2; $\alpha_{i,KPP}$ – коэффициент теплоотдачи в рекуператоре; η_o, ψ – коэффициент эффективности оребрения и коэффициент оребрения соответственно; $Q_{i,r}$ – объемный расход исходных компонентов реакционной смеси; $T'_{i,KP}, T''_{i,KP}$ – температура реакционной смеси на входе и выходе из реакционной ячейки соответственно; $C_{pi,KPP}$ и $\rho_{i,KPP}$ – теплоемкость и плотность газа в зоне рекуператора; $Q_{i,KPP}$ – объемный расход газа в зоне рекуператора; $T''_{i,KPP}, T'_{i,KPP}$ – значения температур на выходе и входе соответствующей ячейки рекуператора; $S_{i,CT3}$ – площадь стенки СТ3; $\frac{\lambda_{i,CT3}}{\delta_{i,CT3}}$ – термическая проводимость стенки СТ3; $\frac{\lambda_{i,ТПИ}}{\delta_{i,ТПИ}}$ – термическая проводимость слоя теплоизоляции; $S_{i,CT4}$ – площадь стенки СТ4; V_{CT4} , c_{CT4} и ρ_{CT4} – объем, теплоемкость и плотность материала стенки СТ4; $\alpha_{Г.СР}$ – коэффициент теплоотдачи окружающей газовой среды.

Программная реализация формализованного описания после перехода к записи в отклонения осуществлена в среде графического программирования LabView 17, которая обладает не только мощным математическим ядром, но и предоставляет широкие возможности в графическом оформлении приложений, благодаря этому был создан не только вычислительный механизм, но и интуитивно понятный визуальный интерфейс, отображающий схему разрабатываемого блока реактора и параметры моделируемого эксперимента в реальном времени (рисунок 7).

Для получения возможности сбора максимального количества сведений о протекании процесса в слое катализатора и проверки адекватности построенной модели спроектирован и изготовлен новый реактора гидрирования – Вариант 2 (рисунок 8).

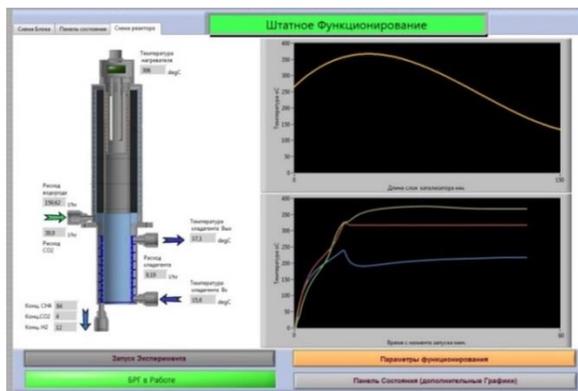


Рисунок 7 – Фронтальная панель головной программы и окно параметров (температура реактора) в визуальном интерфейсе программы

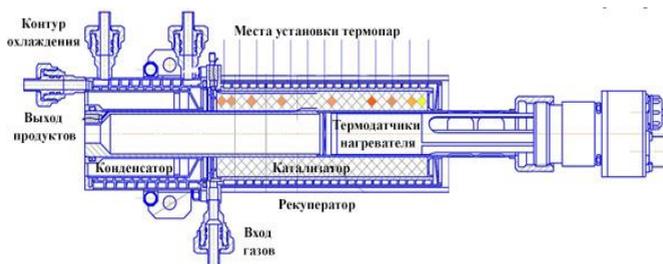


Рисунок 8 – Экспериментальный реактор гидрирования (вариант 2)

На основе анализа профилей температур, полученных на модели, была достигнута высокая сходимость результатов и на установившемся автотермическом режиме (рисунок 9), и в ходе динамического переходного процесса нагрева реактора (рисунок 10).

Спроектированный на этом этапе реактор нового образца показал лучшую производительность на всех режимах по сравнению с реактором, рассмотренном на предыдущем этапе (рисунок 11).

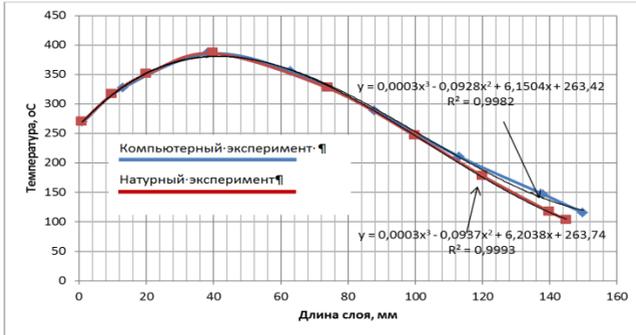


Рисунок 9 – Распределение температур по длине слоя для расхода 160/40 л/час H_2/CO_2 , показаны аппроксимирующие выражения

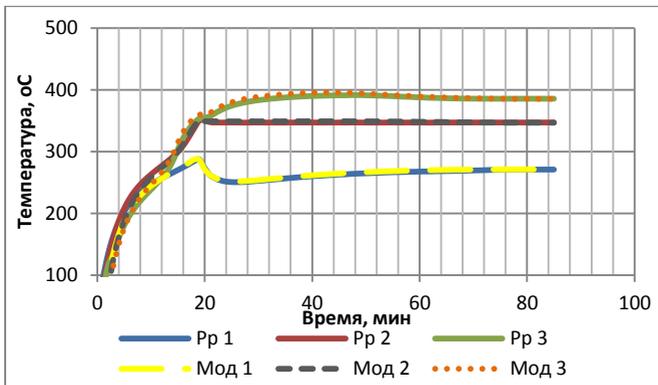


Рисунок 10 – Сравнение результатов моделирования с реальным реактором (вариант 2) в ходе процесса нагрева (температура по датчикам 1;2;3)

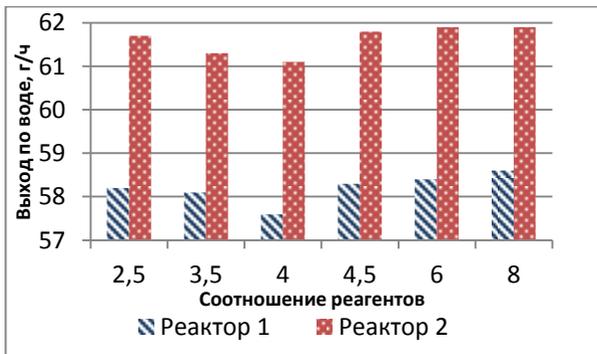


Рисунок 11 – Сравнение производительности реакторов (варианты 1 и 2) в зависимости от соотношения реагентов

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. Пути устранения недостатков реального реактора, выявленных в ходе экспериментальной отработки, были проанализированы на модели и предложена новая конструкция реактора – Вариант 3.

Для устранения недостатков были предложены следующие конструктивные решения:

- перенос креплений нагревателя в противоположную часть реактора, что снизит отток тепла;
- изменение теплоизоляции, установка экрана поверх теплоизоляционного материала;
- 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.

После определения окончательного конструктивного облика реактора, следующим этапом стала разработка блока гидрирования, обеспечивающего работу реактора на борту КА.

В четвертой главе рассмотрены вопросы формирования обобщенной методики выбора конструктивных параметров блока гидрирования диоксида углерода (БГДУ) на основе результатов компьютерных экспериментов, проведенных на созданной имитационной модели реактора гидрирования, и натурных испытаний экспериментальных образцов реакторов.

Разработанная методика основана на применении системного анализа к выбору конструктивных параметров БГДУ, построена по блочному принципу и включает четыре основных раздела, последовательное выполнение которых позволяет получить единое описание БГДУ как функционального блока сложной системы (рисунок 12).

Раздел 1: формирование исходных данных, исходя из программы космической миссии, типа МПА и расчета материального и энергетического балансов определяет необходимую производительность системы.

Раздел 2: формирование информационного описания характеризует тактико-технические требования к блоку гидрирования и является основой для выбора показателей эффективности.

Раздел 3: синтез морфологического описания обеспечивает выбор проектно-конструктивных параметров БГДУ. 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.

Разработанная имитационная модель реактора описывает взаимодействие реакционной зоны с остальными элементами: электронагревателем, рекуператором и конденсатором. Анализ экспериментов позволяет выделить параметры, оказывающие влияние на характер распределения температур в слое и достигаемую степень превращения.

Раздел 4: анализ функционирования в штатном режиме и при возникновении нештатных ситуаций. Введение в методику данного раздела требуется для отработки режимов работы реактора в условиях, приближенных к его реальной эксплуатации на борту МПА.

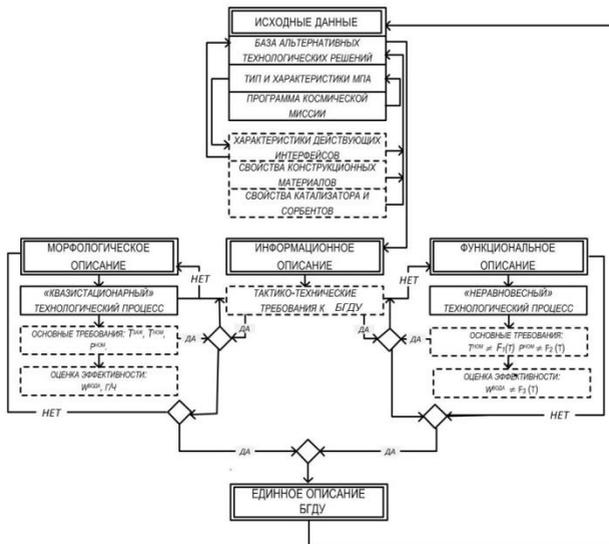


Рисунок 12 – Укрупненная блок-схема методики выбора проектно-конструктивных параметров БГДУ

Технологическая структура стендового образца БГДУ включала: реактор гидрирования Р, электронный регулятор соотношения реагентов РСР, фильтры очистки входящих реагентов Ф1 и Ф2, термоэлектрический холодильник-конденсатор КТ, разделитель газо-жидкостной смеси СМ, мембранную емкость ЕМ и насос Н для откачки полученного конденсата, магистрали, соединения и клапана для коммутации потоков.

В качестве основы формирования функционального описания выбрана расчетная схема конечного автомата Мура, в виде которых описаны следующие элементы БГДУ:

- конденсатор реактора гидрирования;

- термоэлектрический холодильник-конденсатор;
 - разделитель газо-жидкостной смеси,
- а также штатные бортовые системы МПА, оказывающие влияние на работу БГДУ:
- система генерации кислорода «Электрон-ВМ»;
 - блок концентрирования диоксида углерода (БКДУ), входящий в состав системы переработки диоксида углерода;
 - система энергообеспечения (СЭО);
 - система терморегулирования объекта (СТР).

Программная реализация проведена в среде графического программирования LabView, составлена программа, описывающая работу БГДУ (рисунок 13), которая обеспечивает:

- имитацию работы блока гидрирования в реальном и ускоренном времени;
- отображение основных параметров на мнемосхеме системы;
- вывод любых задействованных величин в виде графиков в дополнительных окнах программы;
- имитацию вероятных нештатных ситуаций;
- протоколирование результатов.

Проверка модели функционирования БГДУ на адекватность проводилась на конструкции реактора гидрирования (вариант 3), приведенной на рисунке 14, разработанной после выбора проектно-конструкторских параметров при решении задачи синтеза морфологического описания.

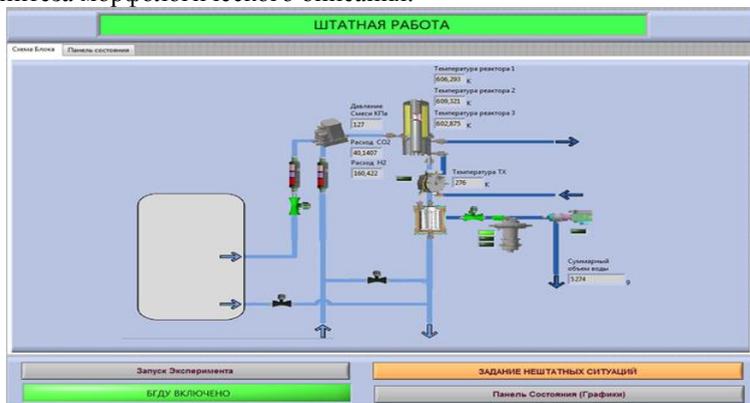


Рисунок 13 – Фронтальная панель программы имитатора блока гидрирования диоксида углерода

При этом контролируемыми параметрами являлись следующие:

- выход по воде;
- время работы электронагревателя до выхода на устойчивый автотермический режим;

- энергопотребление, тепловая нагрузка на СТР и тепловые потери в газовую среду;
- функционирование служебных бортовых систем.

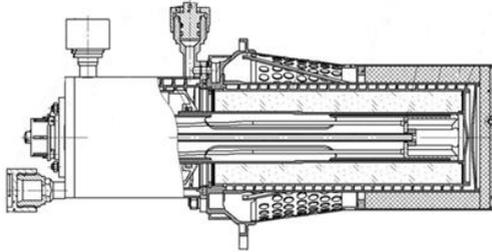


Рисунок 14 – Реактор гидрирования (вариант 3)

На рисунке 15 приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальным реактором на примере изменения характерной температуры процесса гидрирования по времени, начиная с момента запуска, в ходе выхода на автотермический режим.

При анализе нештатных ситуаций (НшС), которые могут возникнуть в ходе реальной эксплуатации БГДУ, в модель добавлена процедура задания типов НшС, таких как:

- выход расхода H_2 за установленные рамки;
- низкое качество подаваемого CO_2 ($O_2 > 4\%$ об.);
- отсутствие циркуляции жидкости в СТР;
- отказ термоэлектрического холодильника-конденсатора.

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 16).

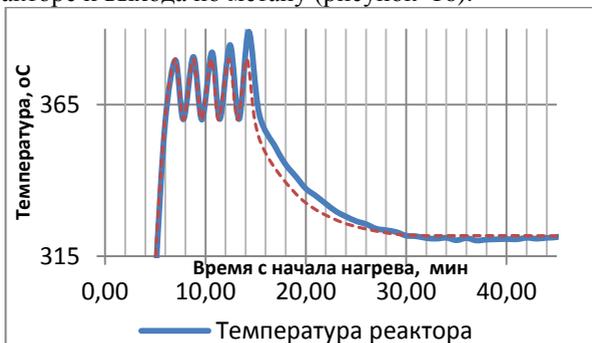


Рисунок 15 – Изменение температуры в реакторе (вариант 3 в составе БГДУ) в ходе нагрева и выхода на автотермический режим

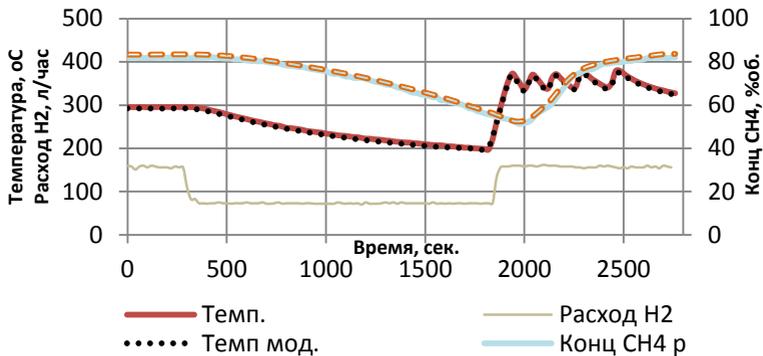


Рисунок 16 – Динамика изменения температуры и концентрации метана на модели и реальном реакторе в случае НшС

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 5% по значениям температуры в реакторе и 2% 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 «Эксплуатация 4 МКС»

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.

Дальнейшие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы целесообразно проводить в следующих направлениях:

- создание блока контроля технического состояния и оценки ресурса при эксплуатации;
- решение задачи оптимизации входящей в БГДУ вспомогательной аппаратуры;
- технология переработки диоксида углерода по реакции Сабатье является хорошо отработанной, однако не позволяет полностью замкнуть цикл по воде на борту МПА из-за потери части водорода в составе метана. Целесообразна разработка и интеграция в блок реактора крекинга метана, что позволит извлечь оставшийся водород и вернуть его в цикл. Для чего потребуется предварительное имитационное моделирование.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Коган, И.Л. Расчетно-экспериментальный анализ работы реактора гидрирования диоксида углерода // Журнал «Труды МАИ». – 2015. – №82, электронный ресурс.

2. Kogan, Ioann. Experimental Analysis of Hydrogenation (Sabatier) Reactor Operation // Proceeding of 66th International Astronautical congress 2015 (SCOPUS). – 2015 – IAC-15.A1.P.6.

3. Коган, И.Л. Имитационное моделирование при проектировании регенерационных систем жизнеобеспечения пилотируемого космического аппарата / И.В. Глебов, И.Л. Коган // Журнал «Космическая техника и технологии». – 2017. – № 4(19).

4. Коган, И.Л. Об адекватности имитационной модели функционирования системы переработки диоксида углерода обитаемых космических объектов / И.В. Глебов, И.Л. Коган // Журнал «Космическая техника и технологии». – 2018. – № 3(22).

5. Коган, И.Л. Имитационная модель системы переработки диоксида углерода с прогнозированием нештатных ситуаций по телеметрической информации // *Авиакосмическая и экологическая медицина: сборник тезисов XVI Конференции по космической биологии и медицине с международным участием (Москва, 5-8 декабря 2016)*. – Т.50. – № 5 спецвыпуск. – С. 105 (276 с.).

Другие публикации

6. Коган, И.Л. Анализ функционирования при проектировании интегрированной системы жизнеобеспечения экипажа межпланетного корабля / И.Л. Коган, А.Е. Коробков, И.В. Глебов [и др.] // *XXI международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: сборник тезисов докладов (Евпатория, 3-10 июля 2016)*. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – С. 48-50 (184 с.).

7. Коган, И.Л. Прогнозирование и имитация нештатных ситуаций в системе переработки диоксида углерода / И.Л. Коган, А.Е. Коробков, А.С. Цыганков [и др.] // *XXI международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: сборник тезисов докладов (Евпатория, 3-10 июля 2016)*. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – С. 50-51 (184 с.).

8. Коган, И.Л. Формирование блока контроля и анализа технического состояния системы переработки диоксида углерода на основе бинарных признаков / И.Л. Коган, А.Е. Коробков, Е.М. Новоселова [и др.] // *XXI международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: сборник тезисов докладов (Евпатория, 3-10 июля 2016)*. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – С. 53-54 (184 с.).

9. Коган, И.Л. Тепловые режимы функционального блока гидрирования системы переработки диоксида углерода / И.Л. Коган, Е.М. Новоселова // *XXI Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов в РКК «Энергия» им. С.П. Королёва: сборник тезисов докладов (Королев, 30 октября-3 ноября 2017)*. – Королев: РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, 2017. – Т. I. - С. 214-215 (320 с.).

10. Коган, И.Л. Оценка технологий переработки углекислого газа для долгосрочных межпланетных полетов / И.Л. Коган, Э.А. Курмазенко, Ю.П. Бутылкин [и др.] // *XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: сборник тезисов докладов (Евпатория, 2-9 июля 2017)*. — М.: Изд-во МАИ, 2017. – С. 194-195 (228 с.).

11. Коган, И.Л. Проблемы и перспективы развития системы гидрирования диоксида углерода в условиях эксплуатации на борту межпланетного космического аппарата / И.Л. Коган, Э.А. Курмазенко, Ю.П. Бутылкин [и др.] // *XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: сборник тезисов докладов (Евпатория, 2-9 июля 2017)*. — М.: Изд-во МАИ, 2017. – С. 197-198 (228 с.).

12. Коган, И.Л. Технологии переработки диоксида углерода для использования в системах жизнеобеспечения космических аппаратов / И.Л. Коган,

А.Е. Коробков, А.С. Цыганков [и др.] // Научно-практическая конференция «Технологии жизнеобеспечения и техносферной безопасности человека»: сборник тезисов докладов (Тамбов, 25 сентября 2018).

13. Коган, И.Л. Химико-технологическая система получения воды из метаболического диоксида углерода и водорода / И.Л. Коган, Ю.И. Валага, Ю.П. Бутылкин [и др.] // XIII международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос»: сборник тезисов докладов (Звездный городок, 13-15 ноября 2019). – Типография ФБГУ ЦПК, 2019. – С. 76-77 (425 с.).

14. Коган, И.Л. Методология выбора технологических параметров реактора Сабатье // XIII международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос»: сборник тезисов докладов (Звездный городок, 13-15 ноября 2019). – Типография ФБГУ ЦПК, 2019. – С. 78-79 (425 с.).

15. Коган, И.Л. Имитационное моделирование функционирования интегрированных систем жизнеобеспечения для экипажей космических аппаратов / И.Л. Коган, Ю.И. Прошкин, Ю.П. Бутылкин [и др.] // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2018»: сборник тезисов докладов (Москва, МАИ 19-23 ноября 2018). – Типография «Люксор», 2018. – С. 312-313 (740 с.).

16. Коган, И.Л. Имитация функционирования интегрированных систем жизнеобеспечения / И.Л. Коган, А.Е. Коробков, А.С. Цыганков [и др.] // XIII международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос»: сборник тезисов докладов (Звездный городок, 13-15 ноября 2019). – Типография ФБГУ ЦПК, 2019. – С. 81-82 (425 с.).

Подписано в печать: 06.04.2021

Объем 1,0 усл.п.л.

Тираж 50 экз. Заказ №0104

Отпечатано в типографии «Реглет»

125171, г. Москва, Ленинградское шоссе д.14 стр.1

+7(495) 971-18-86

www.reglet.ru