

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2021 В.И. Трушляков, К.А. Бражникова, В.А. Урбанский

Омский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 24.03.2021

На примере создания уникальной бортовой системы газификации невырабатываемых остатков жидкого топлива в баках ступени ракеты-носителя (БСГ) рассматривается улучшение качества теоретико-экспериментальных исследований. В связи с уникальностью разрабатываемой БСГ, которая начинает функционирование после выключения маршевого жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), отсутствуют как исследования предложенного способа газификации (испарения) на основе подачи теплоносителя в виде горячего газа в бак с остатками жидкого топлива, так и методики выбора проектно-конструкторских параметров БСГ. Очевидно, что создание методики выбора проектно-конструкторских параметров БСГ, дальнейшая разработка БСГ и исследование её функционирования для улучшения качества невозможно без проведения исследования конвективного процесса газификации в топливном баке. Для разработки физико-математической модели (ФММ) и физической модели (ФМ) процесса газификации рассматривается экспериментальная модельная установка с модельной жидкостью в составе экспериментального стенда.

Ключевые слова: качество, критерии, испарение, газификация, остатки топлива, ступень ракеты, эксперименты, модели.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-2-17-28

Работа выполнена при поддержке Проекта № 2019-0251 от 02.03.2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе создания новых систем ракетно-космической техники, не имеющих аналогов или прототипов, в соответствии с [1] необходимо проведение этапа теоретико-экспериментальных исследований. Одной из основных научно-технических проблем, которая возникает каждый раз на этапе теоретико-экспериментальных исследований – это обеспечение достоверности получаемых результатов физического и математического моделирования, т.к. каждая создаваемая уникальная система включает в себя ряд новых характеристик, требования к которым на стадии научных исследований только формируются. Что приводит к необходимости создания новых математических и физических моделей, их упрощению, принятия ряда допущений для получения обозримых научных и инженерных результатов. Требования по обеспечению достоверности, проведению валидации и верификации результатов каждого этапа создания появляются еще на стадии научных ис-

следований сложных технических систем, о чём говорят имеющиеся документы [2, 3]. На стадии научных исследований решение этой научно-технической проблемы остаётся за исследователем, проектантом.

Ниже, на примере исследования уникальной бортовой системы газификации (БСГ) невырабатываемых остатков жидкого топлива в баках отделившейся ступени РН с ЖРД, рассматривается один из возможных методов улучшения качества теоретико-экспериментальных исследований на этапе создания сложных технических систем. Предлагаемое исследование относится как к нижним ступеням РН, так и орбитальным. Необходимость создания такой системы для орбитальных отработавших ступеней появилась сравнительно недавно и вызвана проблемой регулярных взрывов отработавших ступеней РН с ЖРД на орбитах независимо от страны их создания, что послужило причиной принятия рекомендательного документа [4], соответственно, разработан и российский соответствующий документ [5]. Для нижних отработавших ступеней РН целесообразность создания такой системы обусловлена взрывами и пожарами в районах падения.

Основным задачей БСГ для решения указанных выше проблем является необходимость пассивации остатков жидкого топлива в баках РН с ЖРД после завершения миссии, которые могут достигать до 3 – 5% и более от начальной заправки. Метод пассивации жидких остатков

Трушляков Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИ «Парогазовые смеси в конструкциях ракет-носителей».

E-mail: vatrushlyakov@yandex.ru

Бражникова Ксения Алексеевна, научный сотрудник НИИ «Парогазовые смеси в конструкциях ракет-носителей».

E-mail: rozhaevakseniya@gmail.com

Урбанский Владислав Александрович, аспирант.

E-mail: vladurba95@gmail.com

предполагается на усмотрения разработчика. Как показали многочисленные попытки вскрытия дренажных предохранительных клапанов в баках отработавших орбитальных ступеней РН с ЖРД для сброса жидких остатков топлива окружающее космическое пространство в условиях невесомости не дают требуемого эффекта: происходит сброс газа наддува с капельной смесью топлива в окружающее космическое пространство, что быстро приводит к охлаждению компонента топлива и замерзанию дренажных предохранительных клапанов и последующего разрушения топливного бака от давления паров испарившегося компонента топлива [6].

Предлагаемая БСГ основана на подаче в бак горячего теплоносителя, обеспечивающая испарение компонента топлива. Кроме решения задачи пассивации остатков топлива газификация представляет собой возможность извлечения неиспользуемых энергетических ресурсов, заключённых в невырабатываемых остатках топлива, которые в дальнейшем можно использовать, например, для довыведения ступени РН с полезной нагрузкой после выключения маршевого ЖРД, спуска с орбиты, угловой стабилизации и т.д. [7, 8].

Разработка БСГ осуществляется впервые в практическом ракетостроении в ситуации отсутствия аналогов и прототипов, что приводит к необходимости проведения полного цикла исследований, включающих в себя разработку математических и физических моделей, обеспечение их валидации и верификации.

В работах [9-12] рассматриваются вопросы, касающиеся разработки системы критериев для разрабатываемых математической и физической моделей БСГ.

При сравнении путей улучшения качества исследований на этапе создания сложных технических систем, основанное на проведенном анализе источников из открытой печати, выявлено, что существующие подходы по обеспечению, улучшению и оценке качества проектных разработок включают в себя комплексы действий, направленных на совершенствование системы управления проектами, обеспечение требуемого качества технологического проектирования.

В настоящее время существует ряд методов обеспечения качества, например, программных продуктов из которых можно сделать вывод по применимости этих подходов для улучшения качества процесса научных исследований [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель проводимого исследования заключается в разработке метода улучшения качества теоретико-экспериментальных исследований при создании сложных технических систем на

примере исследования процесса тепло-и массообмена, происходящего в БСГ. Следуя традиционному понятию качества, как аналога достоверности, предлагаемую постановку задачи улучшения качества теоретико-экспериментальных исследований рассмотрим как задачу повышения достоверности исследований, что, в соответствии с современной трактовкой в нормативно-технической документации, можно разделить на два последовательных этапа: валидация и верификация математических и физических моделей [2].

Рассматривается следующая последовательность решения сформулированной задачи: получение достоверной ФММ процесса тепло-и массообмена в баке с остатками топлива при вводе теплоносителя, подтверждённую физическим моделированием. Физическое моделирование в располагаемых условиях осуществляется на уменьшенной физической модели топливного бака, далее экспериментальная модельная установка (ЭМУ), в составе экспериментального стенда. ЭМУ должна удовлетворять критериям подобия процессов, происходящим в топливном баке отработавшей ступени РН на орбите.

Таким образом, необходимо разработать две модели: физическую модель в виде ЭМУ и ФММ в виде системы уравнений, граничных условий и критериев, моделирующих процесс газификации в ЭМУ. Проведя их валидацию и верификацию можно будет утверждать о приемлемости ФММ для расчёта проектно-конструкторских параметров БСГ остатков топлива в баке отработавшей ступени РН в условиях невесомости при подаче теплоносителя.

При проведении валидации моделей, в соответствии с предлагаемым методом, проводятся следующие действия:

1) для ФММ:

– выбор типа уравнений, которые будут положены в основу ФММ (в рассматриваемом случае – уравнения процесса тепло-и массообмена на основе 1 закона термодинамики);

– тип граничных условий, моделирующих невесомость модельной жидкости;

– оценка допущений и упрощений, принятых при выборе типа уравнений;

– разбиении процесса интегрирования системы уравнений на блоки с целью проверки промежуточных численных результатов на основе фундаментальных законов (введённые критерии достоверности);

2) для ЭМУ (физическая модель):

– определение проектно-конструкторских параметров ЭМУ (геометрические параметры, теплоноситель и характеристики модельной жидкости) на основе теории подобия тепло-физических процессов, протекающих в реаль-

ной конструкции топливного бака ступени РН и в ЭМУ по критериям Рейнольдса, Нуссельта, Прандтля;

- установка дополнительных датчиков температуры, давления на ЭМУ для повышения достоверности измерений;

- введение критериев оценки достоверности измерений параметров процесса газификации с целью выявления неисправности системы измерений.

При верификации ФММ и ЭМУ вводятся количественные критерии при сравнении результатов численного и физического моделирования, а также сравнением полученных данных с известными результатами.

Разработанная ФММ в дальнейшем используется для создания методики выбора проектно-конструкторских параметров БСГ.

СХЕМА БСГ И ОПИСАНИЕ ЕЁ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

БСГ на примере для бака окислителя состоит из следующих основных систем (рисунок 1):

- а) система получения теплоносителя в виде горячего газа, которая включает в свой состав бак с пероксидом водорода (ПВ) с мембранной

системой подачи и блок катализатора, где происходит экзотермическая реакция разложения ПВ на высокотемпературную (до 800 градусов С) с составом ~ 34% H_2O и ~ 66% O_2 . В качестве теплоносителя используется смесь продуктов разложения ПВ и газа гелия. Температура теплоносителя, например, для бака жидкого кислорода при работе ЖРД ~ 300 К, в режиме испарения остатков топлива не превышает 500К (из условия сохранения прочности бака).

- б) система ввода теплоносителя в бак, представляющая собой систему форсунок, устанавливаемых на верхнем днище бака окислителя после блока катализатора, обеспечивая оптимальный ввод струй ПГС в свободный объём бака;

- в) система утилизации парогазовой смеси (ПГС) из бака включает в свой состав газореактивные сопла для сброса ПГС из бака, в том числе и для создания требуемых реактивных сил.

БСГ функционирует следующим образом. После выключения маршевого ЖРД в каждом топливном баке остаётся до 3 – 5% и более от начальной заливки топлива. При подаче горячего теплоносителя в баки осуществляется нагрев компонента топлива и его последующее испарение, повышается давление до допустимой величины из условия прочности топливного бака [6].

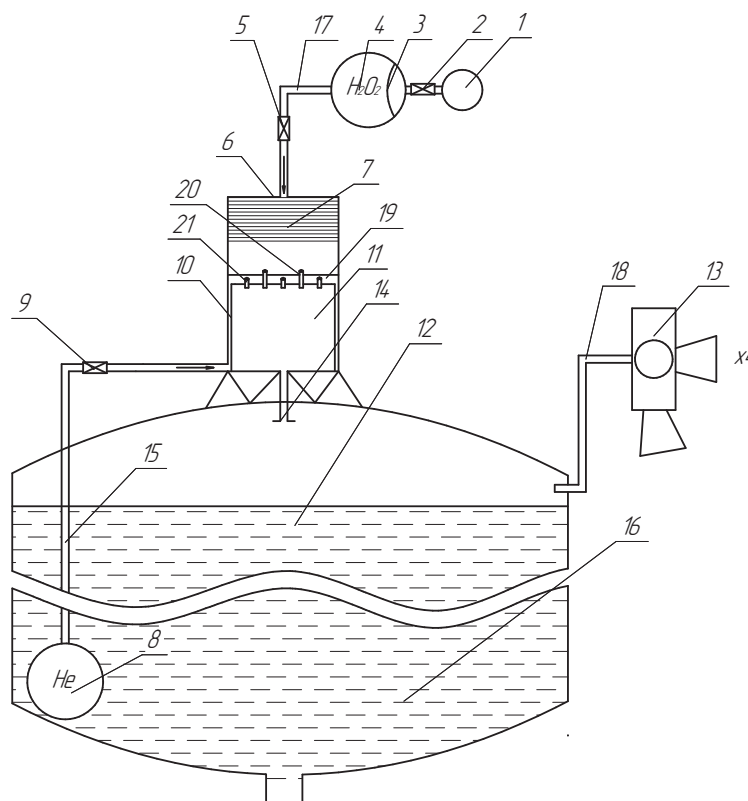


Рис. 1. Схема БСГ с блоком газореактивных сопел:

- 1 – ёмкость газа для управления подачей ПВ; 2, 5, 9 – управляемые клапаны; 3 – выжимная мембрана;
- 4 – шар-баллон с ПВ; 6 – корпус катализатора; 7 – пакет катализатора; 8 – шар-баллон с гелием; 10 – рубашка охлаждения камеры смешения 11 гелия и продуктов разложения ПВ; 12 – бак О; 13 – газореактивные сопла (4 шт.); 14 – магистраль подачи гелия + продуктов разложения ПВ в бак О; 15 – магистраль подачи холодного гелия; 16 – жидкий кислород в баке О; 17 – магистраль подачи ПВ в реактор разложения; 18 – магистраль подачи парогазовой смеси из бака О на газореактивные сопла

Утилизация парогазовой смеси из бака (испарившийся компонент топлива + теплоноситель) может быть различной: от сброса через дренажные предохранительные клапаны – обеспечение требований по пассивации [4, 5], либо сжигание в ЖРД (штатном или специальном) для совершения дополнительных манёвров [7, 8].

На рисунке 1 приведена схема БСГ на примере бака окислителя.

ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ И ВЕРИФИКАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ

Критерии, применяемые при валидации физической модели

Под физической моделью (ЭМУ) подразумевается уменьшенный элемент топливного отсека с модельной жидкостью, куда подаётся теплоноситель (ТН), под различными углами. При этом возможны 2 типа граничных условий жидкости, моделирующих условия невесомости: а) наличие зеркала свободной поверхности жидкости, б) капли жидкости в объёме бака [13].

В связи с тем, что разработка ФММ осуществляется первоначально для ЭМУ, поэтому валидация на уровне разработки физической модели заключается в оценке близости величин критериев подобия для ЭМУ и реальной отработавшей ступени РН на основании теории подобия (сравнение критериев Рейнольдса, Нуссельта, Прандтля). [14, 15].

В таблице 1 приведены значения критериев подобия Рейнольдса, Нуссельта, Прандтля для реальной отработавшей ступени РН (второй отработавшей ступени РН типа «Союз-2.1.в», на которую установлена БСГ на примере бака О), находящейся на орбите, и для экспериментального стенда (ЭС). В качестве исходных данных приняты:

1. Отработавшая вторая ступень РН:

– диаметр бака окислителя 3,7 м (характерный размер);

– температура жидкого кислорода 88 К, плотность 1140 кг/м³,

– в составе реальной ступени РН отсутствует БСГ и, соответственно, система получения теплоносителя; в качестве примера рассматривается теплоноситель, приведённый на рис. 1, с параметрами, температура теплоносителя – 550 °С, плотность теплоносителя при давлении 5 атм и температуре 550 °С равна 0.72 кг/м³.

2. ЭМУ:

– модельная жидкость – вода;

– давление в камере ЭМУ: 3 атм;

– температура ТН: 100 °С;

– геометрические характеристики ЭМУ (Высота x Ширина x Толщина, мм): 500*500*200 мм, высота – характерный размер;

– скорость ТН вблизи поверхности жидкости: 5-7 м/с.

В рассматриваемом случае критериями достоверности при проведении валидации являются близость критериев Нуссельта Nu, Прандтля Pr, Рейнольдса Re процессов, протекающих в ЭМУ к процессам, протекающим в реальном баке отработавшей ступени РН:

$$\frac{Re_{РН}}{Re_{ЭМУ}} \approx 1; \frac{Nu_{РН}}{Nu_{ЭМУ}} \approx 1; \frac{Pr_{РН}}{Pr_{ЭМУ}} \approx 1. \quad (1)$$

Критерии подобия определяются по формулам:

$$Pr = \frac{\nu}{a}; Re = \frac{wD}{\nu}; Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (2)$$

где: w – скорость ввода ТН, λ – теплопроводность, α – коэффициент теплоотдачи, ν – кинематическая вязкость, a – коэффициент теплопроводности, l – характерный размер.

В таблице 1 представлены значения критериев подобия Nu, Pr, Re бака окислителя реальной отработавшей ступени РН типа «Союз-2.1.в» с БСГ и ЭМУ.

Как следует из таблицы 1, критерии подобия для бака О РН типа «Союз-2.1.в» с БСГ и ЭМУ находятся в одном расчетном диапазоне. Критерии подобия удовлетворяют условию (1).

На рисунке 2 приведена фотография ЭС, работающий в условиях атмосферного давления.

ЭМУ, представленная на рисунке 3, используемая в моделировании процесса испарения,

Таблица 1. Значения критериев подобия бака окислителя реальной отработавшей ступени РН типа «Союз-2.1.в» с БСГ и ЭМУ

		Бак «О» РН	ЭМУ
1	Характерный размер, м	3,7	0,5
2	Скорость ТН, м/с	15-25	5-7
3	Кинематическая вязкость ТН, м ² /с	1·10 ⁻⁴	15·10 ⁻⁶
4	Критерий Рейнольдса, Re	3·10 ⁵ – 6·10 ⁵	3·10 ⁵ – 6·10 ⁵
5	Критерий Нуссельта, Nu	370-420	370-420
6	Критерий Прандтля, Pr	0,7-0,75	0,7-0,75



Рис. 2. Экспериментальный стенд для исследования влияния параметров теплоносителя на процесс испарения жидкости

позволяет рассматривать подачу теплоносителя при различных углах ввода в установку

В [16] рассмотрена система критериев валидации ЭМУ, основанная на проведении измерений температуры, давления в различных точках ЭМУ. В качестве критериев принимаются следующие функции, рассчитанные с использованием измеряемых величин датчиков:

а) расчёт на основе проведенных измерений рассчитывается значения суммарной теплоты, поступившей в объём ЭМУ в течение всего эксперимента по формуле:

$$Q_{\Sigma}^0 = c_{ТН} \dot{m}_{ТН} T_{ТН} \tau, \quad (3)$$

где: $c_{ТН}$ – удельная теплоёмкость (ТН),

$\dot{m}_{ТН}$ – измеряемый расход ТН,

$T_{ТН}$ – измеряемая температура ТН,

τ – измеряемое текущее время проведения эксперимента,

б) расчёт суммарного значения теплоты, затраченного на нагрев каждого элемента ЭМУ, участвующего в теплообмене, в течение всего эксперимента, по формуле [16]:

$$Q_{\Sigma}^* = Q_{газ} + Q_{жидк} + Q_{пл} + Q_{ст}, \quad (4)$$

где: $Q_{газ}$ – количество теплоты, расходующееся на нагрев газа в ЭМУ;

$Q_{жидк}$ – количество теплоты, расходующееся на нагрев жидкости в ЭМУ;

$Q_{пл}$ – количество теплоты, расходующееся на нагрев пластины в ЭМУ;

$Q_{ст}$ – количество теплоты, расходующееся на нагрев стенок ЭМУ,

и сравнивают рассчитанные значения Q_{Σ}^0 с Q_{Σ}^* и, в случае выполнения условия:

$$|Q_{\Sigma}^0 - Q_{\Sigma}^*| \geq E_Q, \quad (5)$$

где: E_Q величины инструментальных погрешности, прекращают эксперимент, т.к. наруша-

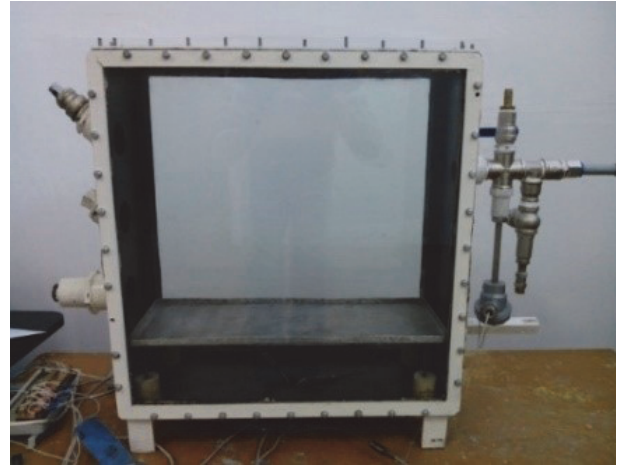


Рис. 3. Экспериментальная модельная установка, моделирующая элемент объёма топливного бака между демпфирующими пластинами

ется 2 закон термодинамики, и выявляют неисправности в системе измерений и регистрации данных;

в) сравнивают температуры ТН $T_{ТН}$ и элементов ЭМУ T_i (температура газа $T_{газ}$, температура жидкости $T_{жид}$, температура пластины $T_{пл}$, температура стенки $T_{ст}$) и, в случае нарушения условия $T_{ТН} \geq T_i$, прекращают эксперимент, т.к. нарушается 2 закон термодинамики, и выявляют неисправности в системе измерений и регистрации данных;

д) на установившемся режиме процесса испарения жидкости непрерывно определяют давление P_r , и температуру T_r газа в ЭМУ и, в случае неудовлетворения условию $P_r/T_r = const$ прекращают эксперимент и выявляют неисправности в системе измерений и регистрации данных;

е) рассчитывают парциальное давление при температуре газа T_r в ЭМУ:

$$P_n^* = \phi \cdot P_{нас}, \quad (6)$$

где: $P_{нас}$ – давление насыщенных паров при температуре газа T_r в ЭМУ,

ϕ – относительная влажность воздуха в ЭМУ, и сравнивают полученное значение парциального давления воздуха в ЭМУ с табличным значением P_n^0

$$|P_n^0 - P_n^*| \geq E_p, \quad (7)$$

где: E_p включает в себя инструментальные и методические погрешности и, в случае удовлетворения данному условию, прекращают эксперимент и выявляют неисправности в системе измерений и регистрации данных.

На рисунке 4 приведена схема ЭС, а также места установки дополнительных датчиков в которых осуществляется расчёт критериев в соответствии с предлагаемым методом.

Было проведен ряд мероприятий, направленных на модернизацию существующего ЭС [16], со-

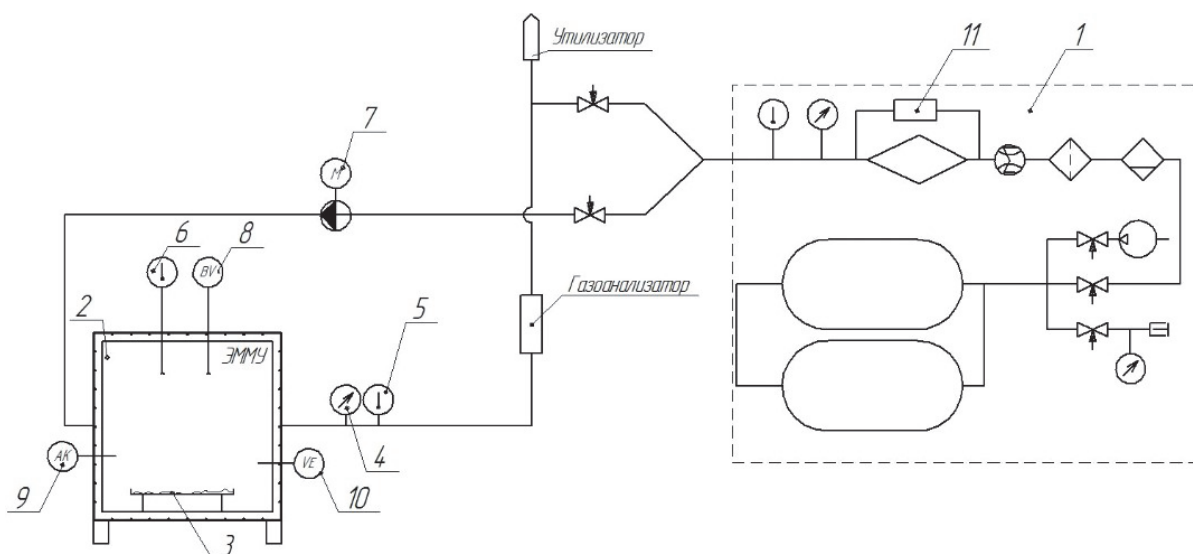


Рис. 4. Пневмогидравлическая схема модернизированного экспериментального стенда: 1 – система подготовки ТН; 2 – ЭМУ; 3 – поверхность пластины, на которой располагается модельная жидкость; 4 – датчики давления 3 шт.; 5- датчики температуры 2 шт.; 6 – мобильные датчики температуры 7 шт.; 7 – датчик расхода теплоносителя; 8 – мобильный датчик влажности газа (гигрометр); 9 – мобильный датчик частоты и амплитуды звука; 10 – мобильный датчик скорости потока теплоносителя; 11 – электронагреватель с теплоизоляцией

става измерительного оборудования (рисунок 4):

- установка нового электронагревателя с пропорциональным интегрально-дифференциальным регулятором для поддержания постоянной температуры теплоносителя;
- теплоизоляция электронагревателя теплоносителя и соединительной арматуры для уменьшения потерь тепла;
- снижение гидравлических потерь и повышение эффективности за счет уменьшения длины соединительных трубопроводов и увеличения диаметра проходного сечения;
- установка мобильного датчика скорости потока теплоносителя внутри экспериментальной модельной установки;
- установка мобильного датчика влажности газа (гигрометр) внутри экспериментальной модельной установки для определения скорости испарения жидкости с поверхности пластины;
- установка дополнительных мобильных датчиков температуры внутри экспериментальной модельной установки для подтверждения второго закона термодинамики, показывающего направленность протекающих процессов: $T_{ТН} \geq T_{Г} \geq T_{Ж} \geq T_{Пл} > T_{СТЕКЛО} > T_{СТАЛЬ}$.
- разбивка поверхности пластины на более мелкие ячейки размером 40x40 мм;
- юстировка и метрологическая поверка всех приборов (настройка датчиков на необходимый диапазон и точность измерений, установка датчиков скорости, влажности и мобильных датчиков температур в необходимых точках экспериментальной модельной установки);
- проведение технологических эксперимен-

тов, подтверждающих возможность измерения температуры внутри жидкости.

На рисунке 5 схематично представлен процесс валидации при физическом моделировании.

Критерии, применяемые при валидации физико-математической модели

В качестве ФММ рассматривается система уравнений на основе первого закона термодинамики, приведенная в [17], в которой были предложены критерии валидации при разработке ФММ.

В качестве примера по критериям подобия для моделирования выбрано уравнение изменения давления в ЭМУ [17] в виде:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{V} (i_g \dot{m}_g + i_{ev} \dot{m}_{ev} - i_{out} \dot{m}_{out}), \\ \frac{dT_w}{dt} = \frac{-q_{rad}^{w-mix} - q_{con}^{w-mix} - q_{rad}^{w-lox} - q_{con}^{w-lox} - q_{rad}^w}{c_w m_w}, \\ \frac{dT_{mix}}{dt} = \frac{i_g \dot{m}_g + q_{con}^{w-mix} + q_{rad}^{w-mix} - q_{rad}^{mix-lox} - q_{con}^{mix-lox} + q_{ev}}{c_{mix} m_{mix}}, \\ \frac{dT_{lox}}{dt} = \frac{q_{rad}^{mix-lox} + q_{con}^{mix-lox} + q_{rad}^{w-lox} + q_{con}^{w-lox} - q_{ev}}{c_{lox} m_{lox}}, \end{cases} \quad (8)$$

где: $p, V, T_w, T_{mix}, T_{lox}$ - давление парогазовой смеси в ЭМУ [Па]; объем ЭМУ [м³], температура стенки [K], температура газа [K], температура жидкости [K], соответственно;

q_{ev} - теплота испарения жидкости; $\dot{m}_g, \dot{m}_{ev}, \dot{m}_{out}$ - массовый расход ТН [кг/с]; массовый расход испаряемой жидкости [кг/с]; массовый расход парогазовой смеси на выходе из ЭМУ [кг/с]; энтальпия парогазовой смеси [Дж/кг], соответственно; i_g, i_{ev}, i_{out} - энтальпии ТН, испа-

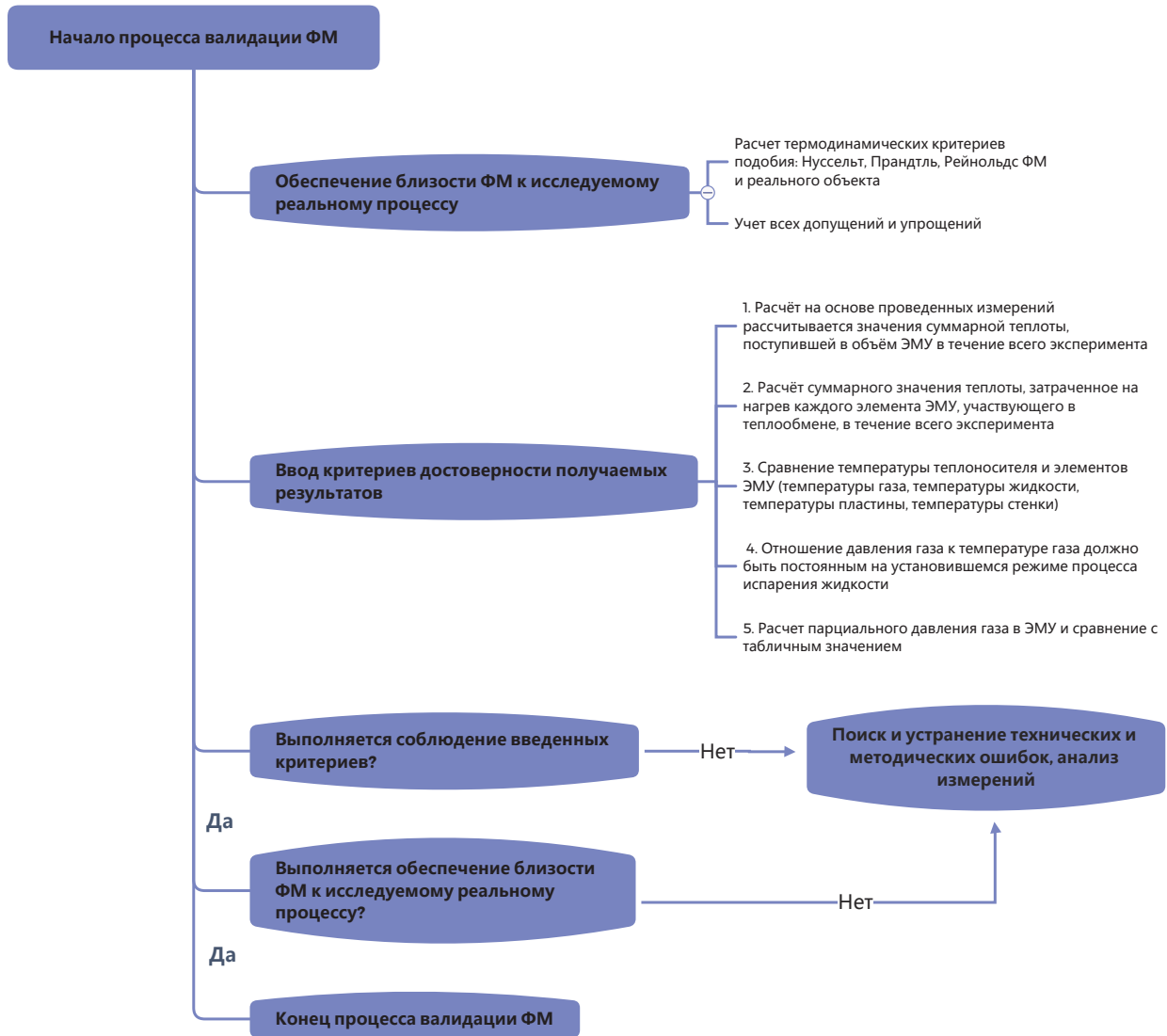


Рис. 5. Процесс валидации при физическом моделировании

ряемой жидкости и парогазовой смеси, выходящей из ЭМУ [Дж/кг], $c_w, c_{lox}, c_{mix}, m_w, m_{lox}, m_{mix}$ – теплоемкости стенки, жидкости, газа, а также массы стенки, жидкости, газа, соответственно.

q_{rad}^{w-lox} – лучистая составляющая от стенки к жидкости:

$$q_{rad}^{w-lox} = \sigma \varepsilon_w F_w \left((T_w(t))^4 - (T_{lox}(t))^4 \right). \quad (9)$$

Здесь $\sigma, \varepsilon_w, F_w, T_w(t), T_{lox}(t)$ – постоянная Стефана-Больцмана, степень черноты стенки, площадь, соприкасающейся с жидкостью, стенки ёмкости, температура стенки, температура жидкости, соответственно,

q_{con}^{w-lox} – конвективная составляющая от стенки к жидкости.

$$q_{con}^{w-lox} = \alpha_w F_w (T_w(t) - T_{lox}(t)), \quad (10)$$

где: α_w – коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости, определяемый по формуле:

$$\alpha_w = \frac{\lambda_w \cdot Nu_w}{l}, \quad (11)$$

λ_w, Nu_w – теплопроводность стенки и число Нуссельта, соответственно; l – характерный размер, для данного варианта граничных условий принята высота ЭМУ.

q_{con}, q_{rad} между другими участниками теплообмена определяются аналогично по формулам (9) - (10).

Начальные условия интегрирования:

1. Давление в баке О – 1 атм.;
2. Масса жидкости – 4.6 г;
3. Свободный объем ЭМУ– 0.05 м³ при температуре компонента – 293 К;
4. Температура теплоносителя – 373 К;
5. Энтальпия жидкости при 293 К – 83.91 кДж/кг;
6. Энтальпия ТН при 373 К – 654 кДж/кг;
7. Энтальпия газа в ЭМУ при 293 К – 553 кДж/кг;
8. Атмосферное давление вне ЭМУ – 101325 Па.

На рисунке 6 схематично представлен процесс валидации при математическом моделировании.

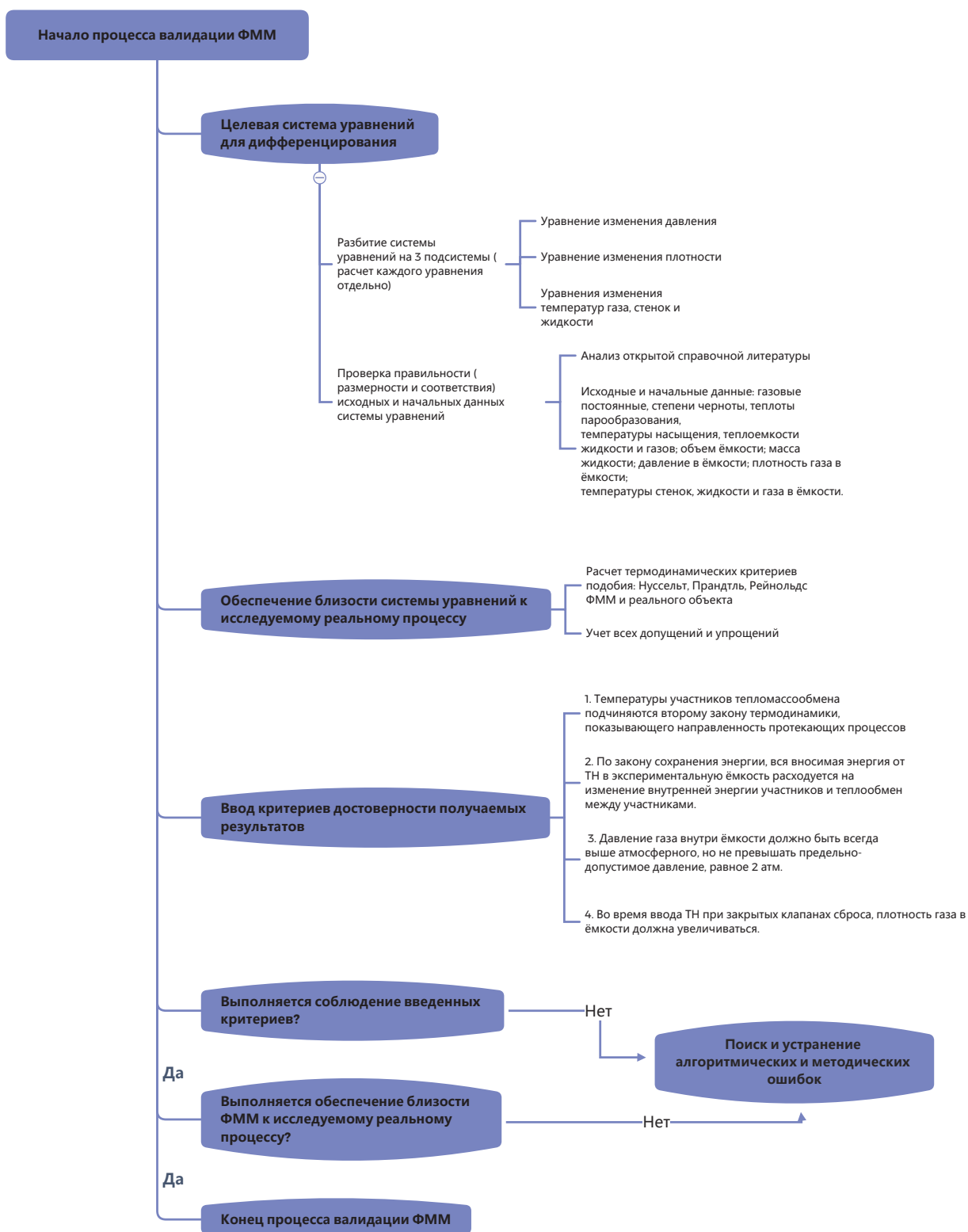


Рис. 6. Процесс валидации при математическом моделировании

Основные допущения моделирования:

1. Температуры стенок бака О, газа в объёме бака О, жидкости топлива в баке О принимаются усреднёнными для каждого участника теплообмена, т.е. практически отсутствует градиент температуры.

2. Термодинамическое воздействие (конвективный теплообмен и теплообмен излучением) ТН

(парогазовой смеси) на поверхность жидкости рассматривается без химического взаимодействия.

3. В процессе испарения предполагается фиксированное состояние жидкости, без колебаний свободной поверхности жидкости.

4. Степень черноты всех участников теплообмена (ТН, газовой смеси, стенок бака, жидкости) полагается постоянной.

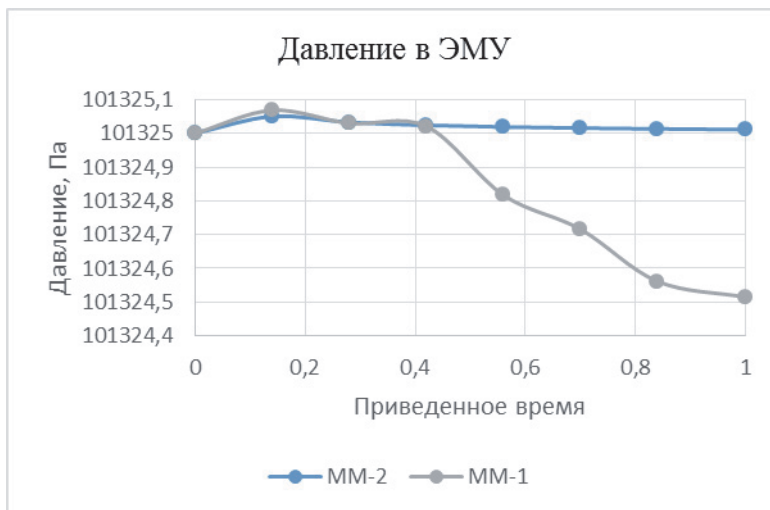


Рис. 7. Графики изменения давления в ЭМУ:
 MM-1 – первое моделирование до использования предлагаемого метода,
 MM-2 – второе моделирование после проведения валидации

На рисунке 7 представлены графики изменения давления в ЭМУ до использования предлагаемого метода и после проведения валидации.

Как следует из рисунка 7, при первом моделировании (MM-1) полученный результат не удовлетворяет введённому условию, а именно, давление газа внутри ЭМУ не должно быть ниже атмосферного давления (0,101325 МПа) и не превышать предельно-допустимое давление, равное 0,2 МПа. В процессе устранения несоответствия были выявлены ошибки расчета ФММ (энтальпий ТН, жидкости и парогазовой смеси). При втором моделировании (MM-2) полученные результаты полностью соответствуют одному из критериев достоверности, а именно, давление газа внутри ЭМУ не опускается ниже атмосферного давления.

Верификация физической и физико-математической моделей

В работе [17] проведено сравнение ФММ с известными результатами экспериментов из

работы [18], в которой исследовалась возможность получения устойчивого и управляемого горения внутри газогенератора за счет подачи газообразного окислителя с постоянным или регулируемым давлением от внешнего источника. Расхождение полученных данных физико-математической модели и известных результатов эксперимента составило менее 10%.

Ниже на рисунке 8 представлено сравнение графиков давления в ЭМУ при физическом и физико-математическом моделировании.

Как следует из рисунка 8, расхождение полученных результатов физического и физико-математического моделирования не превышает 1%.

На рисунке 9 представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований динамики изменения температур всех участников теплообмена.

Как следует из рисунка 9, динамика изменения температур всех участников теплообмена, приведенных на рисунке 9а, близка к динамике

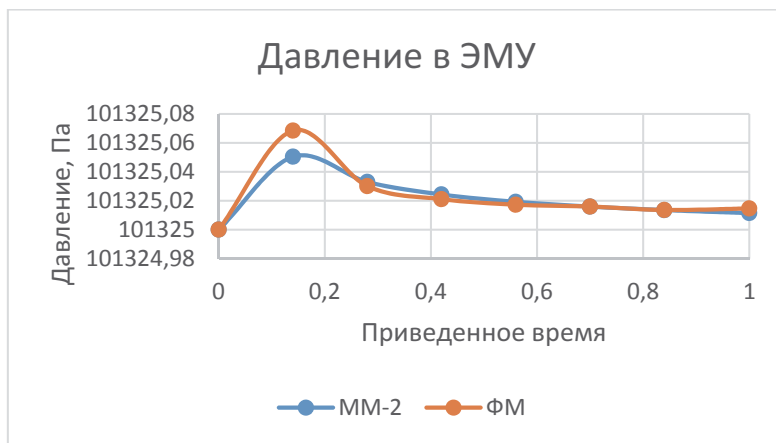


Рис. 8. Графики изменения давления в ЭМУ при физическом моделировании (ФМ) и физико-математическом моделировании (MM-2)

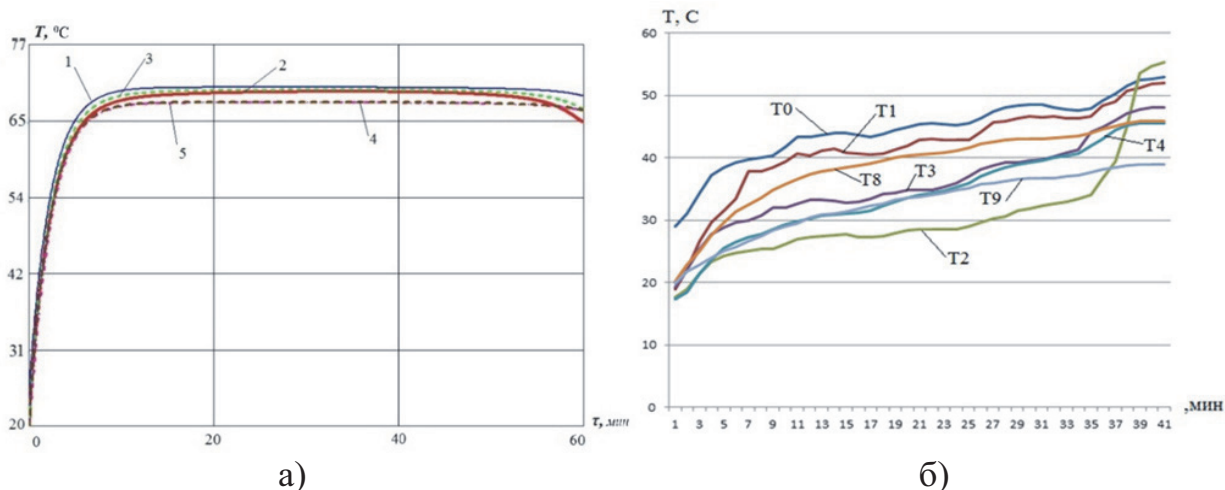


Рис. 9. Графики изменения температур до использования предлагаемого метода:
 а) результаты математического моделирования процесса испарения жидкости в экспериментальной модельной установке в виде изменения температур: 1 – газа, 2 – жидкости, 3 – пластины, 4 – стеклянной стенки установки, 5 – стальной стенки установки;
 б) результаты экспериментальных исследований процесса испарения жидкости в экспериментальной модельной установке в виде изменения температур: T0 – газа в установке; T1 – газа у поверхности пластины; T2 – жидкости на пластине; T3 – пластины на входе в установку; T4 – пластины на выходе из установки; T8 – стальной стенки установки; T9 – стеклянной стенки установки

изменения температур всех участников теплообмена, приведенных на рисунке 9б. При этом минимальная разница температур составляет 28% у газа, а максимальная – 57% у жидкости. Расхождение результатов математического и физического моделирования связано с использованием при математическом моделировании одинаковых значений коэффициентов теплоотдачи для всех участников теплообмена. Для уменьшения расхождения результатов математического и физического моделирования необходимо введение в математическую модель коэффициентов теплоотдачи для каждого участника теплообмена.

На рисунке 10 представлены результаты математического моделирования процесса испарения жидкости с учетом введения допол-

нительных коэффициентов теплоотдачи, полученных экспериментальным путем: от газа к жидкости $\alpha_{г-ж}$, от жидкости к пластине $\alpha_{ж-пл}$, от газа к стеклянной и стальной стенкам экспериментальной модельной установки $\alpha_{г-ст}$, от газа к пластине $\alpha_{г-пл}$.

Сравнительный анализ результатов математического моделирования на рисунке 10 и экспериментальных исследований, представленных на рисунке 9б, показал расхождение значений температур всех участников теплообмена на установившемся режиме с 10 по 30 мин: газ в экспериментальной модельной установке – 2%; жидкость в экспериментальной модельной установке – 11%; пластина в экспериментальной модельной установке – 5%;

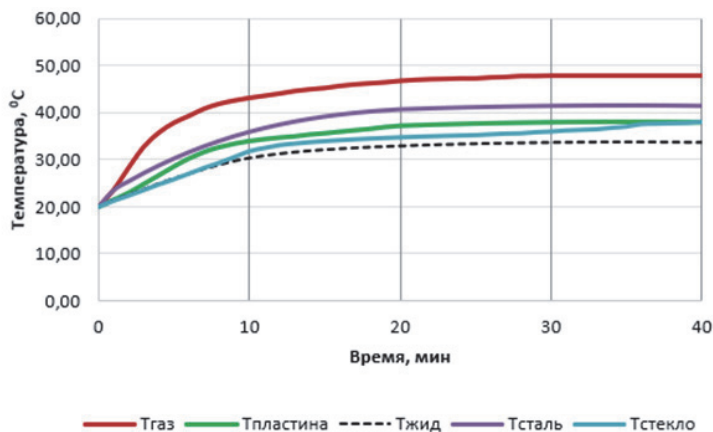


Рис. 10. График изменения температур после использования предлагаемого метода: результаты математического моделирования с использованием уточненных коэффициентов теплоотдачи: Tг (T1) – газ в установке; Tж (T2) – жидкость в установке; Tпл (T3) – пластина; Tстек (T9) – стеклянная стенка установки; Tсталь (T8) – стальная стенка установки

стеклянная стенка экспериментальной модельной установки – 4%; стальная стенка экспериментальной модельной установки – 4%. После использования предлагаемого метода при введении дополнительных коэффициентов теплоотдачи ($\alpha_{2-ж}$, $\alpha_{ж-пл}$, $\alpha_{2-ст}$, $\alpha_{2-пл}$), уменьшился процент отклонения температур участников теплообмена ФМ и ФММ.

ВЫВОДЫ

На основе исследования процесса тепло- и массообмена в перспективной и уникальной бортовой системе газификации остатков топлива в баках ракеты-носителя предложен метод улучшения качества на этапе предпроектных исследований (до этапа разработки методики проектирования бортовой системы), включающий процессы валидации и верификации при разработке:

1. Математической модели процесса испарения модельной жидкости с целью поиска и устранения методических, алгоритмических нарушений. Введены критерии достоверности, выявляющие нарушения фундаментальных законов, что повышает достоверность получаемых результатов моделирования и сокращает время на отладку программы численного моделирования на 15–20%.

2. Физической модели процесса испарения модельной жидкости с целью поиска и устранения методических и технических ошибок, своевременно выявить неисправности элементов системы измерения и недостоверные измерения, своевременного прекращения эксперимента. Введены критерии достоверности измерений параметров процесса газификации, что позволяет сократить время проведения экспериментов, обеспечив экономию энергоресурсов на 20...25 % и повышение производительности труда до 22 %.

3. Введены количественные критерии при сравнении результатов численного и физического моделирования, а также сравнением полученных данных с известными результатами.

Метод обладает общностью и применим для широкого круга исследовательских задач, например, тепло- и массообмена, динамики, баллистики, программирования сложных алгоритмов и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РК-11-КТ. Положение о порядке создания, производства и эксплуатации (применения) ракетных и космических комплексов: изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Роскосмоса от 22 дек. 2011 г. № 232.
2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования : национальный стандарт Российской Федерации : утв. и введен в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 28 сент. 2015 г. № 1391-ст : введен впервые : дата введ. 2015-11-01 / разработ. ОАО «ВНИИС». – М.: Стандартиформ, 2020.– 49 с.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25001-2017. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Планирование и управление : нац. стандарт Российской Федерации : изд. офиц. : утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 22 фев. 2017 г. № 69-ст : введ. впервые : дата введ. 2018-01-01 / подгот. ООО ИАВЦ. – М.: Стандартиформ, 2017. –V, 13с.
4. Руководящие принципы предупреждения образования космического мусора, разработанные Межагентским координационным комитетом по космическому мусору / Комитет по использованию космического пространства в мирных целях / Научно-технический подкомитет, Сороковая сессия, Вена, 17–28 февраля 2003 года.
5. ГОСТ Р 52925-2018. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства : национальный стандарт Российской Федерации : утв. и введен в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 21 сент. 2018 г. № 632-ст : введен взамен ГОСТ Р 52925-2008 : дата введ. 2019-01-01 / разработ. ФГУП ЦНИ-Имаш. – М.: Стандартиформ, 2018.– II, 11 с.
6. Трушляков, В. И. Оценка возможности разрушения топливных баков орбитальной отработанной ступени ракеты-носителя с маршевым ЖРД/ В.И. Трушляков, К.И. Жариков // Тепловые процессы в технике. – 2016. – Т. 8, № 6. – С. 278-287.
7. Трушляков, В. И. Исследование возможности использования газогенерирующих составов для повышения эффективности жидкостных ракет / В.И. Трушляков, Д.Б. Лемперт, М.Е. Белькова // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, вып. 3. – С. 48 – 54.
8. Баранов, Д. А. Проект создания автономной бортовой системы увода отработавших ступеней ракет-носителей в заданные области/ Д.А. Баранов, Ю.Н. Макаров, Я.Т. Шатров, В.И. Трушляков // Космонавтика и ракетостроение. – 2015. – №5 (84). – С. 76 – 82.
9. Трушляков, В. И. Система требований и критериев при разработке математических и физических моделей для повышения качества исследований / В.И. Трушляков, К.А. Рожаева // Омский научный вестник. – 2014. – №3 (144). –С. 75 – 78.
10. Трушляков, В. И. Обеспечение требуемого качества проектирования на этапе научно-исследовательских работ на примере разработки бортовой системы спуска ступеней ракет/ В.И. Трушляков, К.А. Рожаева // Вестник Машиностроения – 2015. – №1. – С. 83 – 87.
11. Trushlyakov, V. I. Developing a test stand to verify accuracy of conducted research at the early design stages of active descent systems of spent launcher stages / K.A. Rozhaeva, V.I. Trushlyakov // Indian Journal of Science and Technology. – 2016.– Vol 9(36). – Pp.102127 – 102130.
12. Trushlyakov, V. I. Evaporation of a Model Liquid /

- V.I. Trushlyakov, K.A. Rozhaeva et al. // Russian Engineering Research. – Vol. 37, № 1. – 2017. – Pp. 1-4.
13. Патент 2461890 Российская федерация, МПК G09B23/00. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого ракетного топлива в баках отделяющейся части ступени ракеты-носителя и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Куденцов В. Ю., Лесняк И. Ю. и др.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. - № 2010141530/12; заявл. 08.10.2010 ; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26 – 9с. : ил.
 14. Луканин, В. Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер // под ред. В. Н. Луканина. М.: Высшая школа, 1999. – 671 с. – ISBN 5-06-003603-0.
 15. Трушляков, В. И. К задаче выбора проектных характеристик экспериментального стенда / В.И. Трушляков, И.Ю. Лесняк, В.А. Урбанский // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2019. – Т.3, №4.– С. 49 –56.
 16. Патент № 2534668 Российская Федерация, МПК F02K 9/96. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого ракетного топлива и устройство для его реализации: № 2013133191/06: заявл. 16.07.2013: опубл. 10.12.2014/ Трушляков В. И., Лесняк И. Ю., Лаврук С. А., Рожаева К. А.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. – 7 с. : ил.
 17. Бражникова, К. А. Обеспечение качества теоретико-экспериментальных исследований на примере разработки бортовой системы испарения невырабатываемых остатков топлива в баках летательных аппаратов / К.А. Бражникова, В.И. Трушляков, И.Ю. Лесняк, В.А. Урбанский // Наука и бизнес: пути развития. – № 12 (102). – 2019. – С. 18-30.
 18. Внучков, Д. А. Исследование работы газогенератора, управляемого подачей газообразного окислителя / Д.А. Внучков, В.И. Звегинцев, Д.Г. Наливайченко, С.И. Шпак // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44, № 6. – С. 18-25.

METHOD OF IMPROVING THE QUALITY OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH AT THE STAGE OF DEVELOPMENT COMPLEX TECHNICAL SYSTEM

© 2021 V.I. Trushlyakov, K.A. Brazhnikova, V.A. Urbansky

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

On the example of development a unique on-board gasification system for non-produced residues of liquid fuel in the tanks of the launch vehicle stage, the improvement of the quality of theoretical and experimental research is considered. Due to the uniqueness of the developed on-board gasification system, which begins functioning after the main liquid rocket engine (LRE) is turned off, there are no studies of the proposed method of gasification (evaporation) based on the supply of a carrier heat in the form of hot gas to the tank with liquid fuel residues, and the methodology for selecting the design-engineering parameters of the on-board gasification system. It is obvious that the creation of a methodology for selecting the design-engineering parameters of the on-board gasification system, the further development of the on-board gasification system and the study of its functioning to improve the quality is impossible without conducting a study of the convective gasification process in the fuel tank. To develop a physical and mathematical model and a physical model of the gasification process, an experimental model installation with a model liquid as part of an experimental stand is considered. *Keywords:* quality, criteria, evaporation, gasification, fuel residues, rocket stage, experiments, models.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-2-17-28

Valery Trushlyakov, Doctor of Technics, Professor, Chief Researcher at the Research Laboratory «Steam-Gas Mixtures in the Designs of Launch Vehicles».

E-mail: vatrushlyakov@yandex.ru

Kseniya Brazhnikova, Researcher at the Research Laboratory «Steam-Gas Mixtures in the Designs of Launch Vehicles».

E-mail: rozhaevakseniya@gmail.com

Vladislav Urbansky, Graduate Student.

E-mail: vladurba95@gmail.com