

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 5. С. 225–234
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 5, pp. 225–234

Научная статья
УДК 621.454.2
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185568>
EDN: <https://www.elibrary.ru/OPEFDA>

Исследование влияния режимов работы и конструкции термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги на тепловое состояние во время работы

Э.С. Цырендоржиев✉

АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Российская Федерация
Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Российская Федерация
tsyrendorzhiev.es@gmail.com✉

Аннотация. В работе выполнено численное моделирование тепловых процессов в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРДМТ). Исследовано влияние начальной температуры, пористости каталитической засыпки, массового расхода топлива и режимов его подачи на тепловое состояние пористой среды. В расчетах использована физико-математическая модель нестационарного фильтрационного горения с учетом гетерогенных и гомогенных химических реакций и тепломассообмена. Установлены зависимости между параметрами режима работы и тепловым состоянием камеры.

Ключевые слова: математическое моделирование, фильтрационное горение, тепломассообмен, пористая среда, нестационарные процессы горения

Для цитирования. Цырендоржиев Э.С. Исследование влияния режимов работы и конструкции термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги на тепловое состояние во время работы // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 5. С. 225–234. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185568>

Original article

Numerical study of the impact of operating modes and design parameters of a low-thrust thermocatalytic liquid-propellant rocket engine on its thermal state during operation

E.S. Tsyrendorzhiev✉

SSC Keldysh Research Center, Moscow, Russian Federation
Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyy, Russian Federation
tsyrendorzhiev.es@gmail.com✉

Abstract. The study presents a numerical investigation of thermal processes occurring in the combustion chamber of a low-thrust liquid-propellant thermocatalytic rocket engine. The research focuses on

understanding how various operational and design parameters influence heat accumulation and distribution within the porous catalyst bed which plays a critical role in the efficiency and reliability of such propulsion systems.

A detailed physical mathematical model of unsteady filtration combustion using Representative Elementary Volume approach was employed. The model accounts for both homogeneous and heterogeneous chemical reactions, as well as heat and mass transfer phenomena between internal and surface gas phases, and the porous matrix. The simulations were performed using the OpenFOAM computational platform leveraging the finite volume method and PISO/SIMPLE algorithms for pressure-velocity coupling and transient flow resolution.

Numerical experiments demonstrate that increasing the initial temperature of the porous catalyst bed reduces the rate of the thermal energy accumulation and limits peak temperature due to proximity to adiabatic temperature of the monofuel decomposition. The relationship between propellant mass flow rate and accumulated energy is found to be nonlinear: exceeding a critical threshold additional increases in flow rate yield diminishing returns due to convective heat losses and limited heat transfer efficiency in the reaction zone. Variation in bed porosity reveals an optimal range where both decomposition efficiency and heat retention are maximized. Lower porosity enhances reaction intensity but reduces the medium's ability to retain heat, whereas higher porosity improves heat storage but can lead to inefficient decomposition. The study also explores the effect of fuel injection schedules. Results indicate that pulsed operation leads to strong thermo-cycling loading of the catalyst bed, potentially accelerating material degradation and reduce operational lifespan.

The results provide valuable insight into the thermal behaviour of a low-thrust liquid-propellant thermocatalytic rocket engines under variable operating conditions. They provide a foundation of the optimization of the engine geometry, designing efficient propellant supply strategies and development of adaptive control algorithms that enhance thermal stability, operational reliability and catalyst longevity under cyclic or continuous operation.

Keywords: low-thrust liquid rocket engine, model of the thermal regime of a rocket engine, filtration combustion, computer simulation, coupled heat exchange

For citation. Tsyrendorzhiev E.S. Numerical study of the impact of operating modes and design parameters of a low-thrust thermocatalytic liquid-propellant rocket engine on its thermal state during operation. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 5, pp. 225–234. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185568>

Введение

Термокаталитические жидкостные ракетные двигатели малой тяги (ЖРДМТ) обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами двигательных установок аналогичного назначения [1], что обуславливает перспективность их дальнейшего совершенствования, включая повышение экономичности и надежности. Одним из ключевых направлений оптимизации характеристик двигателя является разработка математической модели сопряженного теплообмена между рабочим телом и элементами конструкции, позволяющей корректно описывать все этапы эксплуатации двигателя.

Наибольший интерес с точки зрения моделирования представляет процесс фильтрационного

горения жидкого топлива в камере сгорания. Основным преимуществом использования фильтрационного горения для организации рабочего процесса в ЖРДМТ является упрощение инициации разложения монотоплива за счет аккумуляции тепла в засыпке камеры сгорания с целью формирования реактивной струи и тяги. Однако во время продолжительных пауз между включениями двигательной установки запасенное в материале засыпки тепло может распространяться по элементам конструкции, приводя к нарушению теплового режима отдельных узлов и агрегатов. Поиск оптимальных конструктивных решений, а также циклограммы работы двигателя, составляет одно из основных направлений применения моделей фильтрационного горения.

Несмотря на активное применение в ракетно-космической технике и продолжительного исследования механизмов фильтрационного горения [2–4], существующие физико-математические модели данного явления обладают ограниченной функциональностью вследствие высокой сложности протекающих в реакторе физико-химических процессов. Модель нестационарного фильтрационного горения топлива должна учитывать разномасштабные по времени процессы:

- многофазные многокомпонентные течения с протеканием химических реакций;
- радиационный перенос в пористой среде;
- наличие разрывов пористости, характерных для термokatалитических ЖРДМТ.

Моделирование каждого из этих процессов в отдельности представляет собой сложную задачу. В литературе представлен ряд исследований, посвященных изучению влияния массового расхода на скорость фронта разложения [5, 6], определению зависимости положения фронта химической реакции от пористости среды [7], а также учету изменения пористости в ходе эксплуатации [8].

На данный момент моделирование фильтрационного горения жидкости в камере сгорания термokatалитического ЖРДМТ в наиболее полной постановке принадлежит Асенцио [9]. Результаты работы автора легли в основу решателя с открытым исходным кодом на базе платформы численного моделирования OpenFOAM. Модель, предложенная в [9], основана на концепции репрезентативного элементарного объема (Representative Elementary Volume, рисунок 1) – усредненного объема области камеры сгорания двигателя, заполненный следующими компонентами:

- межпоровым газом;
- поверхностным газом;
- твердой фазой – пористой засыпкой.

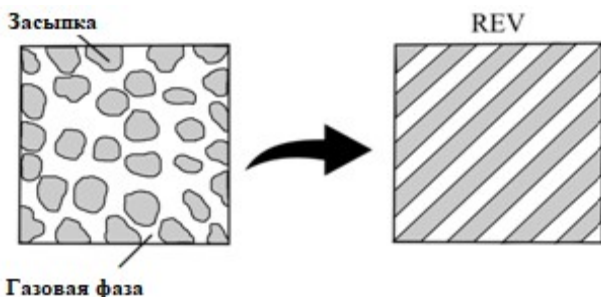


Рис. 1. Схема перехода от реальной геометрии к REV

Применительно к процессам в ЖРДМТ в рамках концепции REV межпоровый газ представляет собой движущуюся часть рабочего тела, в объеме которого происходят гомогенные химические реакции. Поверхностный газ, в отличие от межпорового, считается неподвижным, и представляет часть рабочего тела, в которой происходит гетерогенные химические реакции.

Использование данного подхода с разбиением рабочего тела на различные компоненты позволяет применять методы усреднения для описания сложных разномасштабных процессов, протекающих в камере сгорания ЖРДМТ.

В данной работе проводится численное исследование влияния характеристик и режимов работы ЖРДМТ на тепловое состояние каталитического пакета с применением подхода репрезентативного элементарного объема.

Физико-математическая модель

Для каждого из выделенных компонентов REV осуществляется моделирование характерных физико-химических процессов. Так, при исследовании течения межпорового газа, представляющего из себя смесь идеальных газов, учитываются процессы тепло- и массообмена между межпоровым и поверхностными газами с учетом протекающих в них гомогенных и гетерогенных химических реакций соответственно. Также учитывается теплообмен межпорового газа с материалом пористой засыпки. (рисунок 2).

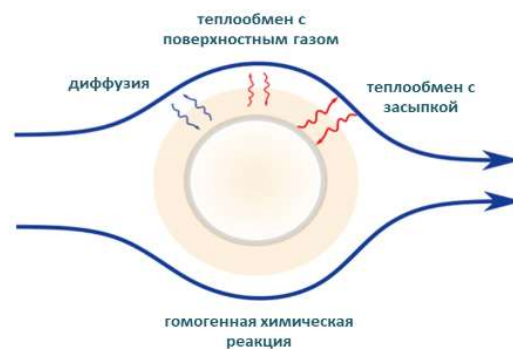


Рис. 2. Процессы в межпоровом газе

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times (\rho \mathbf{v}) = \dot{m}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial (\rho \omega_i)}{\partial t} + \nabla \times (\rho \omega_i \mathbf{v}) - \nabla \times (\varepsilon \rho D_i \nabla \omega_i) = \\ = \varepsilon \dot{r}_i - a_s K_i (\omega_i - \tilde{\omega}_i), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \times (\rho v v) = -\nabla p + \mu \Delta \left(\frac{v}{\varepsilon} \right) - Da \times \mu v - F \times \rho v v, \quad (3)$$

$$\varepsilon \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \times (\rho E v) - \nabla \times (\varepsilon h \nabla a) = \varepsilon q + \frac{\partial p}{\partial t} + Q_c + \tilde{Q}, \quad (4)$$

где ε – пористость засыпки, a_s – поверхность пористой засыпки, $\dot{m}$ – источниковый член, описывающий массообмен между межпоровым и поверхностным газом, $\dot{r}$ – скорость изменения концентрации i -го компонента в ходе гомогенной реакции, K_i – коэффициент массообмена i -го компонента, ω_i – массовая доля i -го компонента в межпоровом газе, $\tilde{\omega}_i$ – массовая доля i -го компонента в поверхностном газе, ρ, μ, a – плотность, динамическая вязкость, температуропроводность межпорового газа, Da – число Дарси, F – число Форхгеймера, E – полная энергия, q – энергия выделяющаяся в ходе гомогенной реакции, Q_c – источниковый член, связанный с теплообменом с пористой средой, $\tilde{Q}$ – источниковый член, описывающий теплообмен с поверхностным газом.

Температурная зависимость динамической вязкости компонентов газовой смеси описывалась в соответствии с моделью Сазерленда в следующем виде:

$$\mu = A_s \frac{T^{\frac{3}{2}}}{T + T_s}.$$

Данная модель адекватно воспроизводит экспериментальные данные в нужном для численного эксперимента диапазоне, значения коэффициентов, используемые в модели, подбирались в соответствии со справочными данными [9].

Для определения величины теплоемкости, энтальпии и энтропии в зависимости от температуры использовалась модель NASA [10], представляющая собой аппроксимации вида:

$$\frac{c_p(T)}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4, \\ \frac{H(T)}{RT} = a_1 + \frac{a_2}{2} T + \frac{a_3}{3} T^2 + \frac{a_4}{4} T^3 + \frac{a_5}{5} T^4 + \frac{a_6}{T},$$

$$\frac{S(T)}{R} = a_1 \ln T + a_2 T + \frac{a_3}{2} T^2 + \frac{a_4}{3} T^3 + \frac{a_5}{4} T^4 + a_7,$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Скорость химической реакции определялась с помощью уравнения Аррениуса в температурной форме:

$$k = A T^b e^{-\frac{T_a}{T}}.$$

Следует отметить, что пространственное распределение пористости засыпки может претерпевать разрыв. Обусловлено это тем, что для реальных двигателей распространена практика применения в начале камеры сгорания засыпки с частицами меньшего диаметра, а ближе к сопловому блоку – с частицами большего диаметра.

При моделировании процессов в поверхностном газе учитываются гетерогенные химические реакции каталитического разложения компонентов топлива и продуктов реакции, диффузия компонента между поверхностным и межпоровым газами, диффузия компонента в поры частицы пористой засыпки, а также его адсорбция и десорбция (рисунок 3).

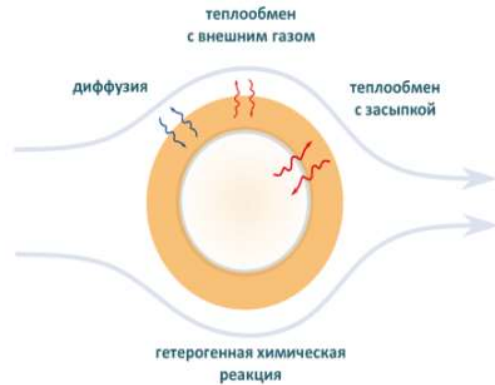


Рис. 3. Процессы в поверхностном газе

В рамках данного представления поведение поверхностного газа описываются следующими уравнениями:

$$\varepsilon_p \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} = -\dot{m}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_p \frac{\partial(\tilde{p} \tilde{\omega}_i)}{\partial t} = \dot{r} + \frac{6}{d_{pa}} K_i \rho_\Sigma (\omega_i - \tilde{\omega}_i), \quad (6)$$

$$\varepsilon_p \frac{\partial(\tilde{p} \tilde{h})}{\partial t} = \varepsilon_p \tilde{q} + \tilde{Q}_c - \tilde{Q}, \quad (7)$$

где ε_p – пористость частиц, $\tilde{\rho}$ – плотность поверхностного газа, $\tilde{h}$ – энтальпия поверхностного газа, $\tilde{\omega}_i$ – массовая доля i -го компонента в поверхностном газе, $\dot{r}$ – скорость изменения концентрации i -го компонента в ходе гомогенной реакции, $\tilde{q}$ – тепловыделение в ходе гетерогенной химической реакции, $\tilde{Q}_c$ – источниковый член, описывающий теплообмен между поверхностным газом и пористой засыпкой, d_{pa} – диаметр частицы пористой засыпки, $\rho_\Sigma = \frac{\rho\varepsilon + \tilde{\rho}\varepsilon_p}{\varepsilon + \varepsilon_p}$ – плотность смеси межпорового и поверхностного газа.

Термодинамические свойства смеси идеальных газов для поверхностного газа определялись аналогично межпоровому газу.

Для материала пористой среды (рисунок 4) учитываются только теплообмен с межпоровым и поверхностным газами с учетом переноса тепла между элементами самой засыпки, описываемые следующим уравнением:

$$(1 - \varepsilon - \varepsilon_p) \frac{\partial(\rho_c c_{p,c} T_c)}{\partial t} = \nabla \times \left((1 - \varepsilon - \varepsilon_p) \lambda_c \nabla T_c \right) - Q_c - \tilde{Q}_c, \quad (8)$$

где ρ_c , $c_{p,c}$, λ_c , T_c – плотность, теплоемкость при постоянном давлении, коэффициент теплопроводности и температура пористой засыпки.

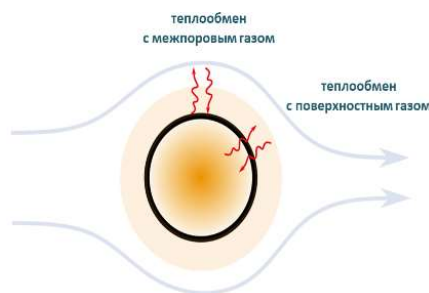


Рис. 4. Процессы в пористой среде

Данная модель содержит ряд допущений, ограничивающих область ее применения, что, в свою очередь требует предварительного анализа областей использования при моделировании динамики конкретных топливных составов при отличных условиях.

Постановка численного эксперимента

В рамках подхода репрезентативного элементарного объема с учетом принятых допущений рассматривается нестационарное фильтрационное горение жидкого монотоплива в камере сгорания термодинамического ЖРДМТ с осесимметричной камерой сгорания с адиабатическими стенками (рисунок 5).

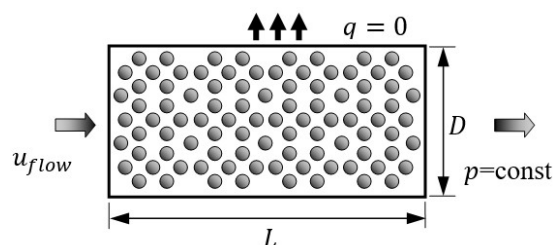


Рис. 5. Схема задачи ($L = 90$ мм, $D = 60$ мм)

Топливо в виде паров в камеру сгорания поступает со скоростью u_{flow} , вектор которой направлен параллельно оси реактора. В качестве граничного условия на стенке задается условие прилипания. В выходном сечении поддерживается постоянное давление $p = 1$ МПа.

Продуктами каталитической реакции разложения монотоплива, формирующими вместе с парами монотоплива межпоровый и поверхностный газы является газообразная смесь водорода, азота и аммиака. Значения коэффициентов, используемые для вычисления теплофизических и термодинамических параметров для двух диапазонов температур, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов для определения теплофизических и термодинамических свойств

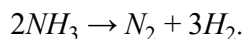
	H_2		N_2		NH_3	
	200–1000 К	1000–6000 К	200–1000 К	1000–6000 К	200–1000 К	1000–6000 К
a_1	2,34433112	2,93286575	3,53101	2,95258	4,46075151	2,09566674
a_2	$7,98052075 \times 10^{-3}$	$8,26608026 \times 10^{-4}$	$-1,23661 \times 10^{-3}$	0,0013969	$-5,68781763 \times 10^{-3}$	$6,14750045 \times 10^{-3}$
a_3	$-1,94781510 \times 10^{-5}$	$-1,46402364 \times 10^{-7}$	$-5,02999 \times 10^{-7}$	$-4,92632 \times 10^{-7}$	$2,11411484 \times 10^{-5}$	$-2,00328925 \times 10^{-6}$
a_4	$2,01572094 \times 10^{-8}$	$1,54100414 \times 10^{-11}$	$2,43531 \times 10^{-9}$	$7,8061 \times 10^{-11}$	$-2,02849980 \times 10^{-8}$	$3,01334626 \times 10^{-10}$
a_5	$-7,37611761 \times 10^{-12}$	$-6,888048 \times 10^{-16}$	$-1,40881 \times 10^{-12}$	$-4,60755 \times 10^{-15}$	$6,89500555 \times 10^{-12}$	$-1,71227204 \times 10^{-14}$
a_6	-813,065581	-917,935173	-1046,98	-923,949	-6707,54514	-6309,45436
a_7	-1,02432865	0,683010238	2,96747	5,87189	-1,34450793	9,59574081

Значения коэффициентов, используемых в модели Сазерленда в таблице 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов для формулы Сазерленда

	H_2	N_2	NH_3
A_s	$6,36 \times 10^{-7}$	$1,406 \times 10^{-6}$	$1,297 \times 10^{-6}$
T_s	293,8	61,67	293,1

Аммиак при движении вдоль реактора, разлагается на азот и аммиак в следствие следующей каталитической реакции:



Для определения скорости реакции применялись следующие параметры: пред экспоненциальный множитель $A = 2,53 \times 10^{12}$, энергия активации, выраженная в температурной форме $T_a = 27777,78$, показатель при температурном множителе $\beta = 0$.

При проведении численного эксперимента варьируются массовый расход топлива, циклограмма подачи топлива в камеру сгорания, начальная температура и пористость засыпки. Пространственная неоднородность пористости не учитывается.

В качестве контрольного параметра используется относительное изменение внутренней энергии материала засыпки

$$\varphi = \frac{Q - Q_0}{Q_0}. \quad (9)$$

Величину внутренней энергии можно определить следующим образом:

$$Q = \int \rho_c (1 - \varepsilon) c T_c dV. \quad (10)$$

Принимая во внимание постоянство теплофизических характеристик материала пористой засыпки и его низкую теплопроводность (равномерное распределение температуры по радиусу реактора), для некоторого характерного времени задача может считаться квазиодномерной. Тогда значение внутренней энергии примет следующий вид:

$$Q = (1 - \varepsilon) \int \rho_c c S T_c dx. \quad (11)$$

Используя соотношения (9) и (11), можно получить зависимость относительного изменения внутренней энергии материала засыпки φ от ее температуры $T_c(x)$:

$$\varphi = (1 - \varepsilon) \int \rho_c c S \left(\frac{T_c(x)}{T_{init}} - 1 \right) dx, \quad (12)$$

где T_{init} – начальная температура материала засыпки.

Численный метод

Задача численно решается методом конечных объемов (CatalyticChamberFOAM [11]) на базе решателя reactingFOAM платформы численного моделирования OpenFOAM.

Процедура решения соответствует алгоритму, согласно которому происходит решение в рамках базового решателя reactingFoam. Помимо основных уравнений, решатель включает классы с дополнительными физическими величинами (описывающими пористость, температуру пористой засыпки и др.), безразмерные числа и уравнения, построенные на их основе. Главный цикл содержит систему уравнений, которые необходимо решить, при этом необходимо включить две внутренние поправки для решения связи давления и скорости, в рамках решателя используются PISO и PIMPLE [12, 13]

Результаты численного исследования

Численные эксперименты проводятся на ЭВМ в однопоточном режиме, время одного расчета составляет 1–6 часов. Пример пространственного распределения полей температуры и давления, полученных в ходе расчета представлены на рисунке 6. Полученные значения характерны для камеры сгорания термokatалитических ЖРДМТ.

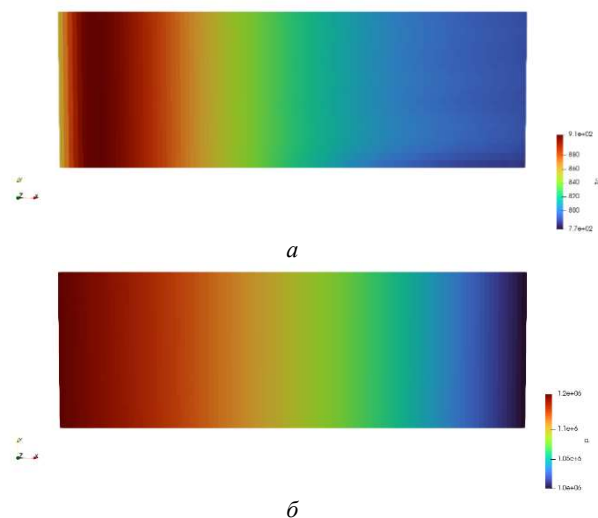


Рис. 6. Распределение температуры пористой (а) среды и давления (б)

Расчетная область была дискретизирована структурированной гексагональной сеткой, количество ячеек в радиальном направлении – 10, количество ячеек в осевом направлении – 200. Данная размерность сетки была обоснована путем проведения исследования на сходимость численного решения, в ходе которого сравнивались ключевые параметры течения и тепломассопереноса. Увеличение числа ячеек сверх указанных не приводило к изменению значений рассматриваемых величин.

Как отмечалось ранее, в рамках численного исследования выполняется варьирование следующих параметров:

- начальная температура пористой засыпки T_{init} ;
- скорость поступающего в реактор топлива u_{flow} ;
- циклограмма подачи топлива $u_{flow}(t)$;
- пористость засыпки ε .

Остальные параметры фиксируются. План численного эксперимента представлен в таблице 1. Изменение внутренней энергии засыпки для всех серий фиксируется относительно безразмерного времени $\tilde{t} = \frac{u_{flow}}{L} t$.

Таблица 3. План исследования

Серия экспериментов	Температура засыпки T_{init} , К	Пористость ε	Скорость подачи топлива u_{flow} , м/с	Циклограмма подачи топлива
1	330	0,4	4	const
	530	0,4	4	const
	780	0,4	4	const
2	780	0,4	2	const
	780	0,4	4	const
	780	0,4	6	const
3	780	0,3	4	const
	780	0,4	4	const
	780	0,5	4	const
4	780	0,4	2	№1
	780	0,4	2	№2
	780	0,4	2	№3

В первой серии экспериментов варьируется начальная температура засыпки (рисунок 7). На графике видно, что скорость роста внутренней энергии уменьшается по мере роста начальной температуры пористой среды, достигая предельного значения, обусловленного адиабатической температурой разложения штатного компонента. Следует отметить, что в процессе валидации было установлено, что модель склонна завышать значение температуры на начальном отрезке времени.

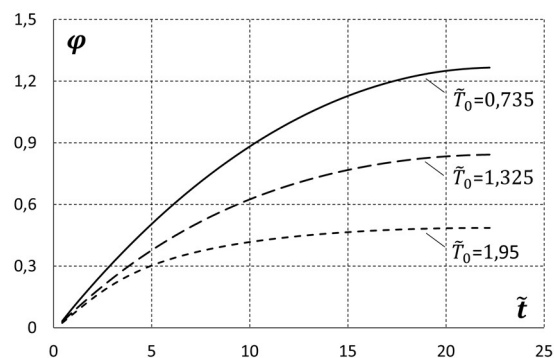


Рис. 7. Эволюция относительной внутренней энергии при различной начальной температуре каталитического пакета $\tilde{T}_0 = T_{init}/T_0$ ($T_0 = 400$ К)

Результаты второй серии численного эксперимента, заключающейся в варьировании скорости подачи топлива, представлены на рисунке 8. Увеличение массового расхода подразумевает увеличение количества энергии, которое может быть передано в ходе разложения штатного компонента в пористую среду. Из рисунка 8 видно, что при увеличении скорости подачи компонента, количество накопленной в засыпке энергии увеличивается непропорционально. Это может быть объяснено как существованием предельного значения массового расхода, при котором дополнительно выделявшаяся энергия не успевает быть переданной в пористую среду данного размера и, следовательно, указывает на влияние размеров камеры сгорания на ее тепловое состояние, так и на увеличение интенсивности отбора тепла из пористой засыпки рабочим телом в ходе конвективного теплообмена.

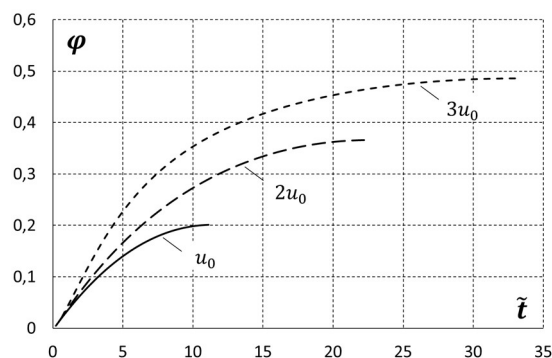


Рис. 8. Эволюция относительной внутренней энергии при различной скорости подачи топлива u_0

Третья серия экспериментов посвящена исследованию влияния пористости на тепловое состояние материала засыпки. Изменение пористости

подразумевает изменение эффективной поверхности контакта штатного компонента с катализатором, что отражается на количестве выделяемого тепла в ходе разложения. При этом количество запасенной в пористой среде энергии соразмерно объему твердого тела $V_c = (1 - \varepsilon)V_{total}$. Таким образом существует «оптимальное» значение пористости, позволяющее как обеспечить максимальное выделение тепла, так и его эффективное поглощение. На рисунке 9 видно, что переход от меньшей пористости к большей сопровождается как раз переходом через это предельное значение.

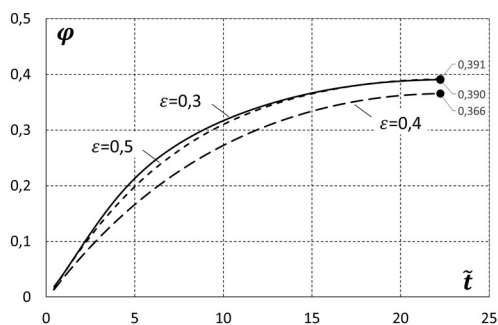


Рис. 9. Эволюция относительной внутренней энергии при различной пористости засыпки ε

Одним из способов регулирования количества накопленного в пористой среде тепла является изменение режима работы двигателя. Для оценки влияния данного фактора предлагается рассмотреть несколько циклограмм работы двигателя, представленные на рисунке 10. Циклограммы различаются количеством импульсов, с помощью которых одинаковая масса топлива подается в камеру сгорания.

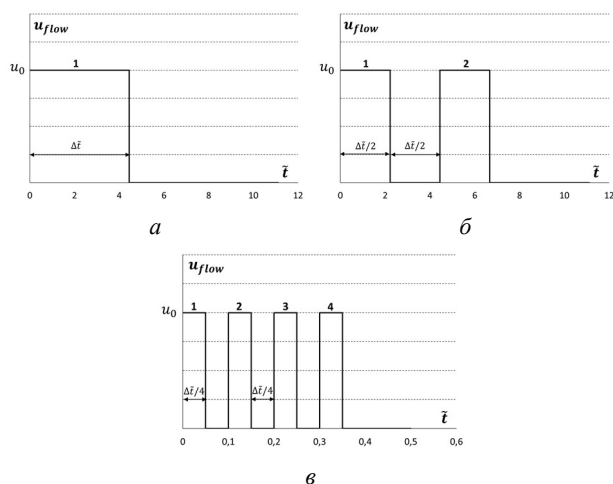


Рис. 10. Циклограммы подачи топлива ($u_0 = 2$ м/с, $\Delta \tilde{t} = 4,44$), а – циклограмма № 1, б – циклограмма № 2, в – циклограмма № 3

Исходя из результатов моделирования (рисунок 11) можно сделать вывод о более высокой тепловой нагрузке на пористую среду в случае импульсного режима работы двигателя, следовательно использование таких режимов работы следует ограничить.

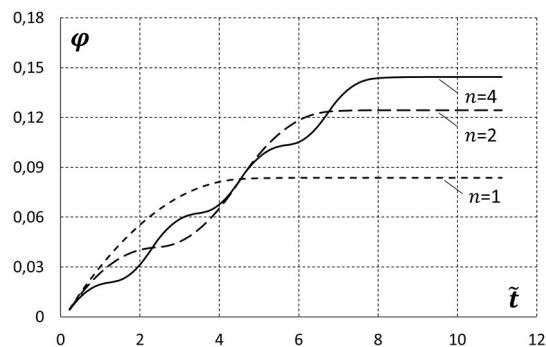


Рис. 11. Эволюция относительной внутренней энергии при различных циклограммах подачи топлива (n – количество импульсов)

Заключение

Результаты проведенного численного исследования демонстрируют значительное влияние начальной температуры пористой засыпки на тепловое состояние камеры сгорания. Увеличение начальной температуры приводит к снижению как скорости аккумуляции тепловой энергии в засыпке, так и ее предельного значения, определяемого, в первом приближении, адиабатической температурой разложения топлива.

Установлена нелинейная зависимость аккумулязированной тепловой энергии в пористой засыпке от массового расхода топлива. Как следует из численного эксперимента, при превышении определенного порогового значения расхода дальнейшее его увеличение не вызывает пропорционального роста запасенной энергии, что указывает на возможные ограничения по интенсивности теплообмена в зоне каталитической реакции.

Оптимальная величина пористости каталитической засыпки (с точки зрения организации рабочего процесса в камере сгорания) определяется балансом между необходимостью обеспечения развитой удельной поверхности контакта катализатора с топливом (для высокой эффективности разложения) и теплоемкостью пористой структуры, приводящей к тепловым потерям в камере сгорания. Варьирование пори-

стости напрямую сказывается на распределении температурных полей и полноте процесса разложения.

Параметры циклограммы подачи топлива оказывают определяющее влияние на динамику теплового состояния двигателя, особенно при импульсных режимах работы. Такие режимы сопряжены с интенсивными термоциклическими нагрузками на каталитическую засыпку, что может являться фактором, лимитирующим ее ресурс. Для предотвращения локальных перегревов и продления срока службы катализатора требуется разработка и верификация оптимальной стратегии подачи топлива, учитывающей длительность импульсов, пауз и эффективность внешнего теплоотвода.

В качестве перспективных направлений развития рассматриваемой математической модели следует рассматривать учет теплообмена между пористой засыпкой и стенками камеры сгорания, а также интеграцию моделей, описывающих механизмы деградации катализатора при длительной эксплуатации и термоциклировании. Это позволит существенно повысить точность прогнозирования тепловых режимов и разработать обоснованные рекомендации по увеличению ресурса двигательных установок.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и отработке термокаталитических ЖРДМТ с фильтрационным горением, а также при создании адаптивных алгоритмов управления, направленных на оптимизацию рабочих характеристик, а также повышение надежности и продление срока службы двигателя.

Список источников

1. Leverone F., Cervone A., Gill E. Cost analysis of solar thermal propulsion systems for microsatellite applications // *Acta Astronautica*. 2019. № 155. pp. 90–110.
2. Kesten A.S. Analytical study of catalytic reactors for hydrazine decomposition // *Quarterly progress report*. 1966.
3. Masse R., Allen M., Spores R. et al. AF-M315E propulsion system advances and improvements // In *52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. 2016. p. 4577.
4. Persson M., Anflo K., Dinardi A. et al. A family of thrusters for ADN-based monopropellant LMP-103S // In *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. 2012. p. 3815.
5. Kakutkina N.A. Regimes of filtration combustion of liquid monopropellants // *Combustion, explosion and Shock Waves*. 2008. Vol. 44. pp. 388–396.
6. Какуткина Н.А. Предельные явления при фильтрационном горении жидких монотоплив // *Физика горения и взрыва*. 2009. Т. 45. № 2. 29–39 с.
7. Zhou X., Hitt D. Numerical modeling of monopropellant decomposition in a micro-catalyst bed // In *35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*. 2005. p. 5033.
8. Hwang C.H., Lee S.N., Baek S.W. et al. Effects of catalyst bed failure on thermochemical phenomena for a hydrazine monopropellant thruster using Ir/Al₂O₃ catalysts // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. Vol. 51. № 15. pp. 5382–5393.
9. Chase J., Malcolm W. NIST-JANAF thermochemical tables // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1998. Vol. 9.
10. McBride J., Gordon S., Reno M.A. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species. NASA Langley Research Center. 1993. 90 p.
11. Asencio J.R., Savonov R.I., Marques R.I. An Open-source Solver to Model the Catalytic Decomposition of Monopropellants for Space Thrusters // *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2020. Vol. 12. p. 1120.
12. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics // Springer International Publishing. 2016. 817 p.
13. Holzmann T. Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM. 2003.

References

1. Leverone F., Cervone A., Gill E. Cost analysis of solar thermal propulsion systems for microsatellite applications. *Acta Astronautica*. 2019;(155):90–110.
2. Kesten AS. Analytical study of catalytic reactors for hydrazine decomposition. *Quarterly progress report*. 1966.
3. Masse R, Allen M, Spores R et al. AF-M315E propulsion system advances and improvements. In *52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. 2016. p. 4577.
4. Persson M, Anflo K, Dinardi A et al. A family of thrusters for ADN-based monopropellant LMP-103S. In *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. 2012. p. 3815.
5. Kakutkina NA. Regimes of filtration combustion of liquid monopropellants. *Combustion, explosion and Shock Waves*. 2008;44:388–396.
6. Kakutkina NA. Limit phenomena in filtration combustion of liquid monotools. *Fizika goreniya i vzryva*. 2009; 45(2):29–39. (In Russ.).
7. Zhou X, Hitt D. Numerical modeling of monopropellant decomposition in a micro-catalyst bed. In *35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*. 2005. pp. 5033.
8. Hwang CH, Lee SN, Baek SW et al. Effects of catalyst bed failure on thermochemical phenomena for a hydra-

- zine monopropellant thruster using Ir/Al₂O₃ catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012; 51(15):5382–5393.
9. Chase J, Malcolm W. NIST-JANAF thermochemical tables. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1998;9.
 10. McBride J, Gordon S, Reno MA. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species. *NASA Langley Research Center*. 1993. 90 p.
 11. Asencio JR, Savonov RI, Marques RI. An Open-source Solver to Model the Catalytic Decomposition of Monopropellants for Space Thrusters. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2020;12:1120.
 12. Moukalled F, Mangani L, Darwish M. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. *Springer International Publishing*. 2016. 817 p.
 13. Holzmann T. Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM. 2003.