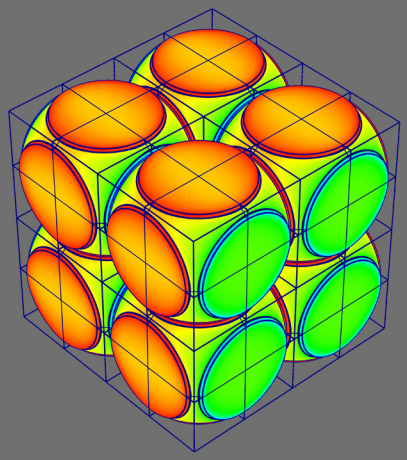
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Цырендоржиев Э. С. Численное моделирование фильтрационного горения в камере сгорания термокаталитического ЖРДМТ на монотопливе. Математическое моделирование и численные методы, 2025, № 2, с. 130–144.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/378/

Параметры загрузки:
IP: 3.41.188.32
17.11.2026 07:49:35

УДК 621.454.2 DOI: 10.18698/2309-3684-2025-2-130144

Численное моделирование фильтрационного горения в камере сгорания термокаталитического ЖРДМТ на монотопливе

© Э. С. Цырендоржиев[1,2]

[1] АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, 125438, Россия
[2]МФТИ, Физтех, Москва, 117303, Россия

С помощью численных методов проведен анализ влияния скорости подачи монотоплива на положение фронта максимальной температуры межпорового газа в камере сгорания термокаталитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги при помощи фазовых портретов. Получены количественные карты положений фронта максимальной температуры межпорового газа и качественные карты устойчивой работы для однородных засыпок с разной пористостью. При построении карт в качестве варьируемых параметров были выбраны пористость засыпки, температура засыпки к моменту запуска двигателя, а также скорость подачи топлива в камеру сгорания. Построена регрессионная модель для предсказания положения фронта и проведен анализ построенной модели. Сформулированы рекомендации по обеспечению стабильной работы изделия с однородной засыпкой.

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

Введение. Несмотря на многие преимущества термокаталитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги (регулируемость тяги, отсутствие необходимости в сложной системе зажигания и для некоторых топлив - экологичность) [1, 2] их применение связано с рядом трудностей, обусловленных технологическими процессами создания отдельных элементов, разработка такого двигателя осложнена отсутствием данных по влиянию параметров работы двигателя на характеристики внутрикамерных процессов при работе изделия, так как большинство работ концентрируются на воспроизведении сложной физики фильтрационного горения [3-5]. Среди работ направленных на исследовании можно выделить публикацию [6], рассматривающую влияние скорости подачи топлива и свойств каталитического пакета на процессы разложения и горения топлива на основе нитрата гидрокисламина.

При работе с термокаталитическими ЖРДМТ можно выделить несколько фронтов: фронт разложения монотоплива, фронт максимальной температуры пламени, фронт максимальной температуры пористой засыпки. Описание положения и скорости движения каждо-

го из этих фронтов можно использовать в инженерной практике. Например, приближение точки с максимальной температуры пламени и фронта разложения монотоплива может привести к переходу от процесса фильтрационного горения на засыпке к процессу самопроизвольного разложения монотоплива в подводящей трубопроводной арматуре двигательной установки. Положение точки максимальной температуры пористой засыпки позволяет охарактеризовать теплонагруженность изделия, а также делать более взвешенные предположения о размере зоны, где может наблюдаться деградации засыпки в следствие термоциклических нагрузок.

Анализ поведения фронта возможен различными способами. Проведение спектрального и сингулярного анализов временного ряда, описывающее положение фронта может позволить выявить закономерности в его развитии, определить имеются ли пики на характерных ненулевых частотах [7].

Несмотря на полезность спектрального и сингулярного анализа для выявления частотных особенностей процесса, эти методы не дают исчерпывающей информации об устойчивости стационарных состояний. Анализы частот позволяют выявить характерные периоды колебаний неустойчивых фронтов, но ничего не говорят об устойчивых состояниях. Получить более детальную информацию возможно с помощью построения фазовых портретов в координатах $(x, \dot{x})$, где x – положение фронта, а $\dot{x}$ – его скорость [8]. Фронт будем считать устойчивым при условии, что его фазовая траектория будет стремиться к некоторому аттрактору. В противном случае, если фазовая траектория будет иметь циклический характер или же вовсе хаотична, использование параметров работы, приведших к такой ситуации, является нецелесообразным конструкторским решением. Вдобавок к этому в данной работе режим работы будет считаться неустойчивым, если за время подачи топлива в камеру сгорания, фронт достиг конца пористой засыпки, что говорит о неэффективном использовании конструктивных особенностей изделия.

Вдобавок к получению информации, которую можно использовать для построения карт устойчивости работы изделия, данный способ анализа позволяет получить карты положения фронта при условии, что фронт стабилизировался в каком-то месте.

Математическая модель и постановка численного эксперимента. Для формирования системы уравнений расчетная область аппроксимируется с помощью метода REV [10], позволяющего заменить сложную микроструктуру пористой среды на гомогенизированную модель с осредненными параметрами для межпорового газа, поверхностного газа и твердой фазы. Система уравнений, включающая в себя уравнения сохранения массы для межпорового газа, поверхностного газа и компонентов этих сред, уравнения сохранения мо-

мента импульса для межпорового газа и уравнения сохранения энергии для всех трех участников фильтрационного горения представлена ниже:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = \dot{m}$$

$$\varepsilon \frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i v) - \nabla \cdot (\varepsilon \rho D_i \nabla Y_i) = \varepsilon \dot{\omega}_i - a_s K_i \rho_m (Y_i - Y_i)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon^2} \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 v - Da \cdot \mu v - F \cdot \rho v v,$$

$$\varepsilon \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E v) - \nabla^2 \cdot (a \varepsilon h) = \varepsilon q + \frac{\partial p}{\partial t} + Q_c + \tilde{Q},$$

$$\varepsilon_p \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} = -\dot{m},$$

$$\varepsilon_p \frac{\partial (\tilde{\rho} Y_i)}{\partial t} = \dot{\tilde{\omega}} + a_s K_i \rho_\Sigma (Y_i - Y_i),$$

$$\varepsilon \frac{\partial (\tilde{\rho} \tilde{h})}{\partial t} = \varepsilon \tilde{q} + \widetilde{Q_c - Q},$$

$$(1 - \varepsilon_p - \varepsilon) \frac{\partial (\rho_c c_{p,c} T_c)}{\partial t} = \nabla \cdot \left((1 - \varepsilon - \varepsilon_p) \lambda_c \nabla T_c \right) - Q_c - \widetilde{Q_c}.$$

где ε — пористость засыпки, a_s — площадь поверхности пористой засыпки, $\dot{m}$ — источниковый член, описывающий массообмен между межпоровым и поверхностным газом, $\dot{\omega}$ — скорость изменения концентрации i-го компонента в ходе гомогенной реакции определяемая с помощью уравнения Аррениуса, K_i —коэффициент массообмена i-го компонента, Y_i — массовая доля i-го компонента в межпоровом газе, Y_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 межпорового газа, 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, ε_p — пористость частиц, $\tilde{\rho}$ — плотность поверхностного газа, $\tilde{h}$ — энтальпия поверхностого газа, $\dot{\tilde{\omega}}_i$ — скорость изменения концентрации i-го компонента в ходе гетерогенной реакции, $\tilde{q}$ — тепловыделение в ходе гетерогенной химической реакции, Q_c — источниковый член, описывающий теплообмен между поверхностным газом и пористой за-

сыпкой, d_{pa} — диаметр частицы пористой засыпки, $\rho_\Sigma = \dfrac{\rho\varepsilon + \tilde{\rho}\varepsilon_p}{\varepsilon + \varepsilon_p}$ — плотность смеси межпорового и поверхностного газа, ρ_c, $c_{p,c}$, λ_c, T_c — плотность, теплоёмкость при постоянном давлении, коэффициент теплопроводности и температура пористой засыпки.

В качестве начальных условий в расчетной области $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ задаются начальная температура межпорового газа и пористой засыпки, концентрации компонентов в межпоровом и поверхностных газах, скорость и давление межпорового газа:

$$T_c(\mathbf{x},0) = T_{c,0},$$
$$T(\mathbf{x},0) = T_0,$$
$$Y_i(\mathbf{x},0) = Y_{i,0},$$
$$Y_i(\mathbf{x},0) = Y_{i,0},$$
$$v(\mathbf{x},0) = v_0,$$
$$p(\mathbf{x},0) = p_0.$$

где T_c — температура пористой засыпки, T — температура межпорового газа, $x \in \Omega$.

В качестве граничных условий на входной границе:

$$v_x = u_{flow}(t);\ Y_i = Y_{i,in}; T = T_{in};\ \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0.$$

в выходном сечении:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{n}} = 0;\ \frac{\partial Y_i}{\partial \mathbf{n}} = 0;\ \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0;\ p = p_{out};$$

на стенке:

$$\mathbf{v}\cdot\mathbf{n} = 0;\ \frac{\partial Y_i}{\partial \mathbf{n}} = 0;\ \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0;\ \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0.$$

Межпоровый газ рассматривается как идеальный газ. Калорические уравнения для межпорового и поверхностного газов имеют следующий вид:

$$\frac{c_p(T)}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4,$$
$$\frac{H(T)}{R} = a_1 + \frac{a_2}{2} T + \frac{a_3}{3} T^2 + \frac{a_4}{4} T^3 + \frac{a_5}{5} T^4 + \frac{a_6}{T}$$
$$\frac{S(T)}{R} = a_1 ln(T) + a_2 T + \frac{a_3}{2} T^2 + \frac{a_4}{3} T^3 + \frac{a_5}{4} T^4 + a_7$$

Методика обработки результатов численного эксперимента. Для проведения серии численных экспериментов использовался модифицированный решатель на базе OpenFOAM [9], разработанный для моделирования фильтрационного горения.

Основное внимание в численных экспериментах уделим рассмотрению фронта максимальной температуры межпорового газа. Особенностью засыпки, используемой при моделировании термокаталитического двигателя является низкая теплопроводность материала, вследствие чего отсутствует искривление фронтов, поэтому результаты трехмерного расчета можно считать квазиодномерными. Данное допущение упрощает способ определение точки максимальной температуры. Существуют различные способы для вычисления скорости изменения положения фронта [11, 12], однако для фазовых портретов данное значение скорости $\dot{x}$ для момента времени t_i определялось с помощью метода центральных разностей:

$$\dot{x}(t_i) = \frac{dx}{dt} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}.$$

Для первой точки координата по оси ординат вычислялась как

$$\dot{x_0} = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0},$$

а последней точки по формуле

$$\dot{x}_N = \frac{x_N - x_{N-1}}{t_N - t_{N-1}}.$$

Результаты расчетов и их обсуждение. Для начала рассмотрим примеры фазовых портретов. Для наглядности рассмотрим следующую постановку задачи.

В начальный момент времени половина расчетной области занята газообразным парами монотоплива. Монотопливо уже диффундировало на поверхность, то есть с началом расчета начинается реакция разложения монотоплива на катализаторе. Расчетная область нагрета равномерно до температуры $T_{c,0} = T_0 = 500\ K$. В начальный момент времени межпоровый газ имеет значение скорости, соответствующее граничному условию $v(\mathbf{x}, 0) = u_{flow}(0)$, $x < L/2$.

На рис. 2 представлены фазовые портреты для серии численных экспериментов, направленных на исследование влияния скорости подачи топлива в камеру сгорания. Маркером в виде кружочка на графике отмечено положение первой точки в фазовом пространстве, крестиком отмечена последняя вычисленная точка в фазовом пространстве.

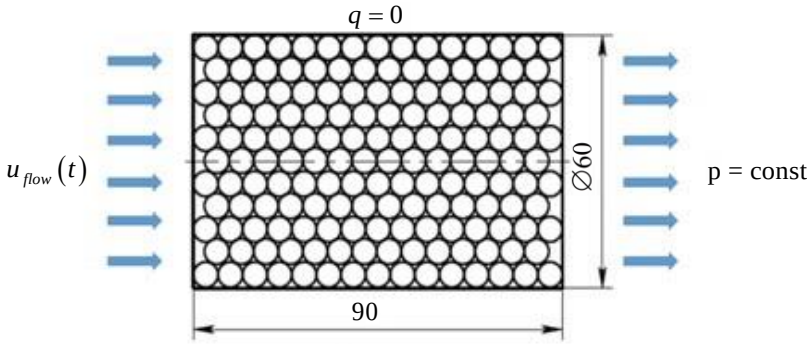


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи

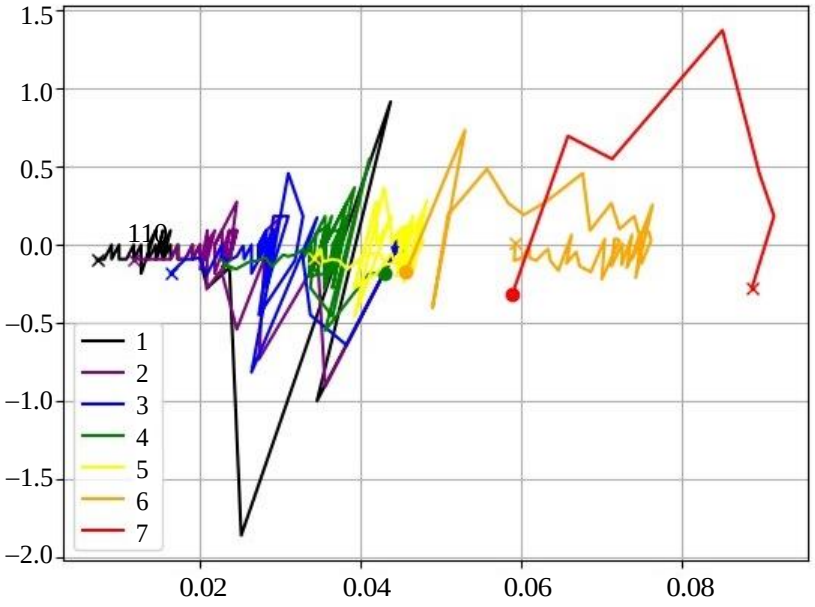


Рис. 2. Фазовые портреты фронтов при различных скоростях подачи топлива в камеру сгорания (1…7 м/с)

Из фазовых портретов видно, что в большинстве из рассмотренных случаев, несмотря на периодическое изменение скорости, связанное с инерционностью тепловых процессов в пористой засыпке в целом фронт движется в сторону входного сечения, и только при достаточно высокой скорости подачи в камеру сгорания наблюдается продвижение фронта к выходному сечению.

Для построения карт будем использовать несколько другую, более физически обоснованную постановку. В начальный момент времени на засыпку с пористостью ε и начальной температурой $T_{c,0}$, равномерно заполняющую расчётную область, подается топливо при температуре $T_{in} = 400\ K$. В качестве варьируемых параметров выбе-

рем начальную температуру $T_{c,0}$ засыпки и скорость подачи топлива в камеру сгорания u_{flow}.

Начальную температуру засыпки $T_{c,0}$ будем варьировать в пределах 300…900 К с шагом 50 К, начальную скорость u_{flow} — в диапазоне 1…6,5 м/с, с шагом 0,5 м/с.

Для большей наглядности представления результатов, варьируемые параметры обезразмерены следующим образом. Относительная начальная температура θ засыпки определялась как:

$$\theta = \frac{T_{c,0} - T_{ref}}{T_{ad} - T_{ref}},$$

где T_{ref} — минимальная температура засыпки, T_{ad} — адиабаитическая температура пламени.

Скорость подачи была приведена к числу Рейнольдса, используемого для течений в пористых средах Re_{pa} следующим образом:

$$\frac{Re}{\varepsilon} = \frac{\rho u_{flow} d_{pa}}{\mu},$$

где d_{pa} — размер элементов пористой засыпки, μ — динамическая вязкость подаваемого монотоплива. Данный способ обезразмеривания нужен для демонстрации влияния пористости на положение фронта при прочих равных условиях.

Положение фронта x было отнесено к размеру расчетной области L и определялось как:

$$\xi = \frac{x}{L}.$$

Таким образом, карты устойчивости будут строиться в следующих координатах относительная начальная температура засыпки θ — относительная скорость подачи топлива $\frac{Re}{\varepsilon}$.

Ниже приведена карта положений фронта для заспыки с пористостью $\varepsilon = 0,4$.

На рис. 3 видно, что карта имеет недиагональный характер, значит, имеет смысл оценить влияние параметров на положение фронта, для этого построим регрессионную модель. Модель реализована в виде полиномиального разложения второго порядка в признаковом пространстве ($Re/\varepsilon,\ \theta$):

$$\xi\left(\frac{Re}{\varepsilon}, \theta\right) = 0,00003\frac{Re}{\varepsilon} - 0,30747\theta - 0,00001\frac{Re}{\varepsilon}\cdot\theta + 0,90516\theta^2.$$

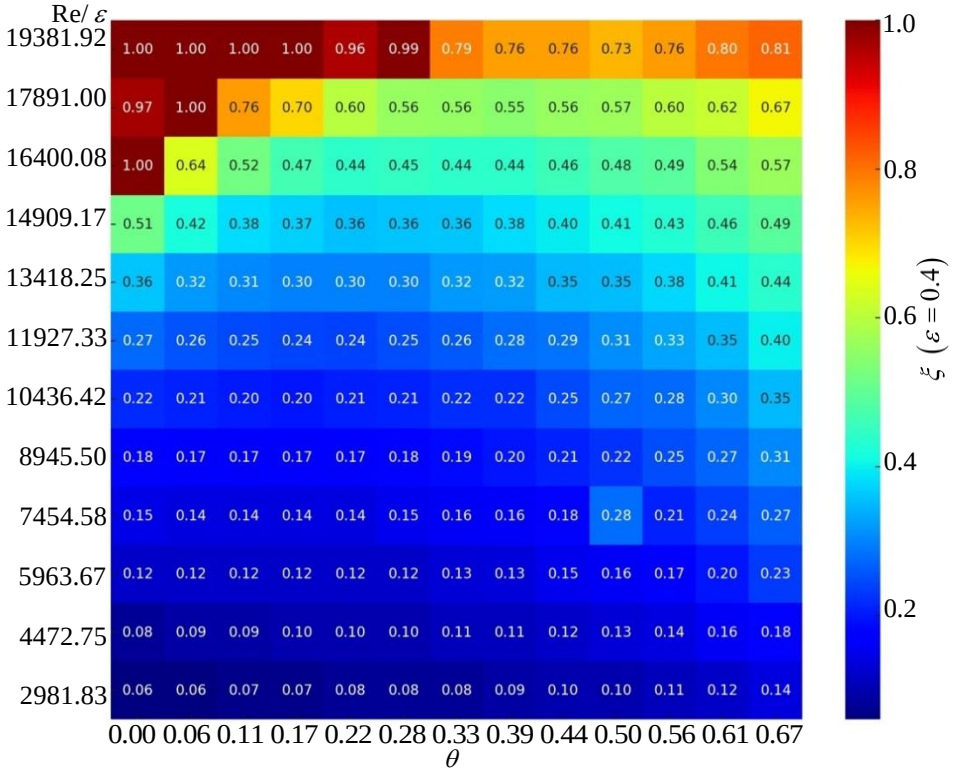


Рис. 3. Карта устойчивых положений фронтов ($\varepsilon = 0,4$)

Модель показала высокую точность аппроксимации, коэффициент детерминации $R^2 = 0,994$, что позволяет использовать её в качестве инструмента для инженерных расчетов. Применение моделей более высокого порядка не дало существенного прироста точности.

Учитывая разность в 4–5 порядков между числовыми значениями переменных, интерпретация коэффициентов модели не позволяет однозначно говорить о вкладе параметров в конечный результат. Применим *z*-нормализацию [13] к каждому признаку, тогда модель будет иметь следующий вид:

$$\xi\left(\left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)_s, \theta_s\right) = 0,22501 + 0,22221\left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)_s + 0,00091\theta_s +$$

$$+0,08495\left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)_s^2 - 0,03661\left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)_s \theta_s + 0,03807\theta_s^2,$$

где

$$\left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)_s = \frac{\frac{Re}{\varepsilon} - 11304,55}{5227,54},$$

$$\theta_s = \frac{\theta - 0,3295}{0,2094}.$$

Рассматривая коэффициенты модели в стандартизованных переменных, отметим, что вклад скорости подачи больше, учитывая, что коэффициент перед линейным членом перед $\left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)_s$ в 240 раз больше, чем перед θ_s, перед квадратными членами в 2 раза больше.

Рассмотрим теперь влияние пористости на положение фронта. Заметим, что пористость влияет не только на уравнения сохранения [14], но и на интенсивность реакции, так как изменение пористости влияет на площадь поверхности, на которой происходит реакция разложения. Сравним карту устойчивых положений фронтов на рис. 3 с аналогичной картой для изделия, в котором засыпка имеет пористость $\varepsilon = 0,5$.

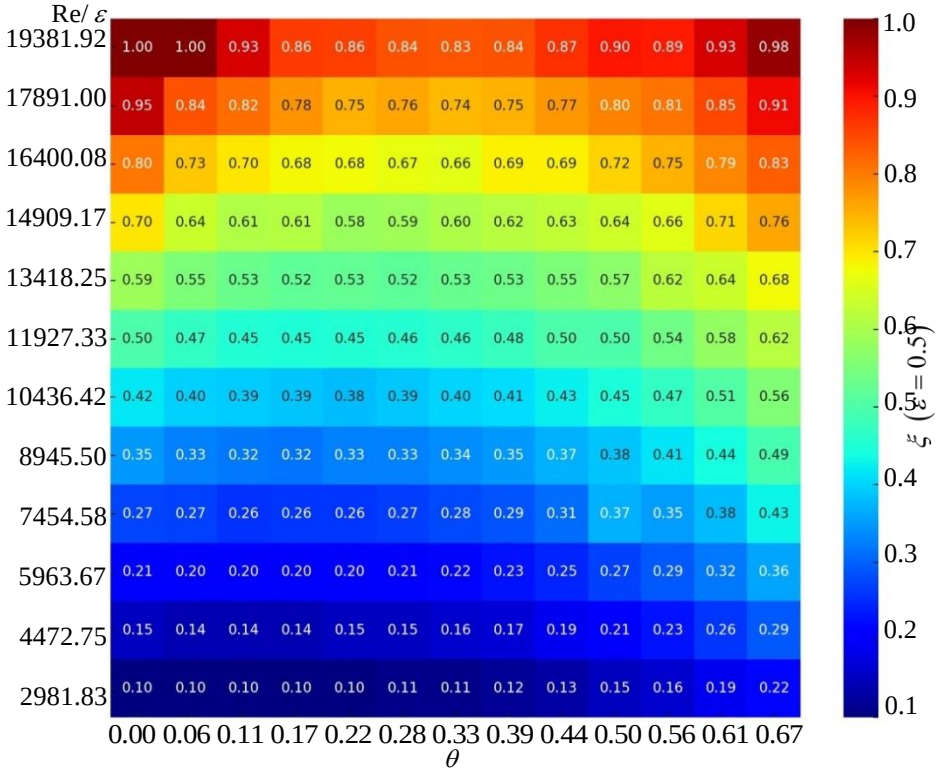


Рис. 4. Карта устойчивых положений фронтов ($\varepsilon = 0,5$)

Анализ карт показывает, что увеличение пористости в целом приводит к увеличению дистанции между входным сечением и стабильным положением фронта. Для наглядности построим карту разностей положений фронтов.

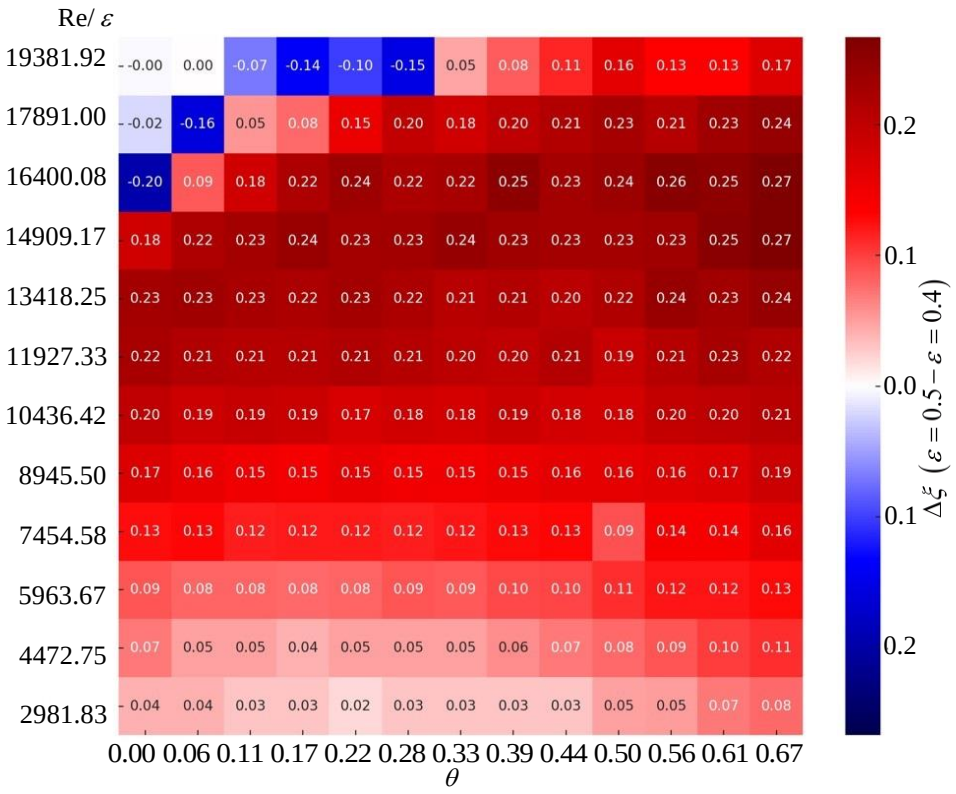


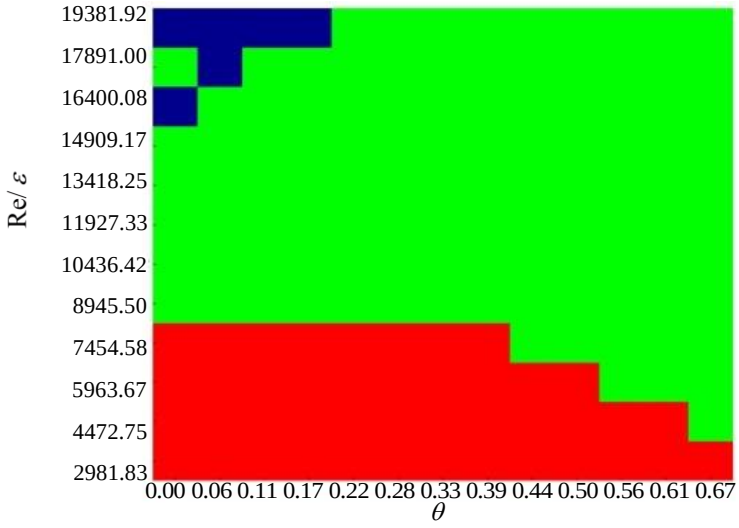
Рис. 5. Карта разностей положений фронтов между двумя случаями $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 0,5$

Из рис. 5 видно, что смещение тоже имеет нелинейный характер и сильнее проявляется при увеличении скорости подачи монотоплива. При этом с ростом скорости подачи влияние температуры тоже проявляется заметнее.

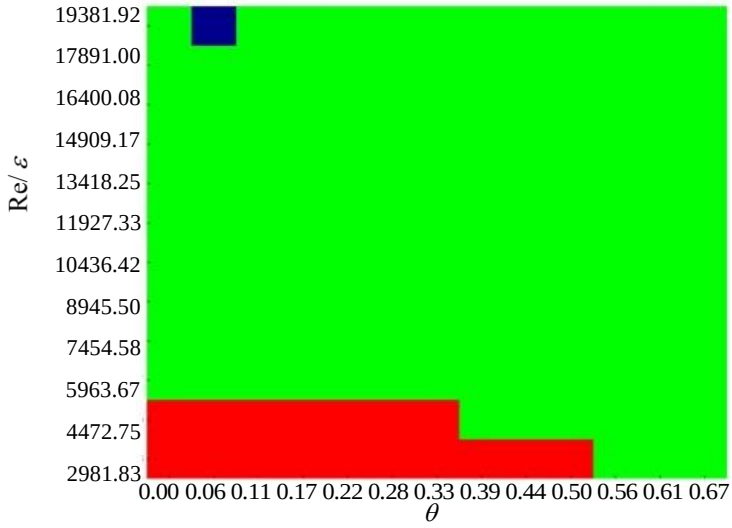
Так как карты на рис. 3–4 нацелены на определение безопасных режимов эксплуатации изделия, введем понятие «безопасной» области и сравним ее изменение при варьировании пористости засыпки. Под «безопасной» областью будем понимать участок, в котором положение фронта зафиксировалось в диапазоне $0,16 < \xi < 0,94$. Выбор данного диапазона обусловлен толщиной фронта. В настоящей работе был применён подход, основанный на анализе градиента температуры. В качестве толщины фронта принималось расстояние между двумя точками слева и справа от максимума температуры, в которых абсолютное значение градиента температуры опускалось ниже установленного порогового уровня. В качестве такого порога было выбрано значение 100 К/м, что позволило надёжно выделять наиболее активную зону реакции и адекватно оценивать степень локализации фронта. Стоит упомянуть, что толщина фронта тоже может использоваться для определения устойчивости фронта, более узкий фронт

характеризует более устойчивый режим работы двигателя. Дополнительный сдвиг левой границы обусловлен высокой адиабатической температурой пламени и служит дополнительным буфером позволяющим минимизировать риски воспламенения топлива в подводящей трубопроводной арматуре.

На карте устойчивости красным будет указана зона, в которой фронт находится слишком близко ($\xi < 0{,}16$), зеленым участки устойчивой работы, а синим участки, в которых произошел или может произойти срыв фронта с пористой части ($\xi > 0{,}94$):



а)



б)

Рис. 6. Карты устойчивых режимов работы термокаталитического ЖРДМТ
а) – $\varepsilon = 0{,}4$; б) – $\varepsilon = 0{,}5$

На рис. 6 выше нагляднее видно, как увеличилась «безопасная» зона при увеличинии величины пористости засыпки. Следовательно меньшее сопротивление при уменьшившейся же эффективной поверхности реакции каталитического разложения позволило стабилизировать фронт на большем расстоянии от входного сечения.

Рекомендации. Полученные выше результаты, позволяют утверждать, что увеличение скорости подачи топлива в камеру сгорания позволяет добиться спутного движения фронта. Поскольку одной из целевых функций при проектировании ракетного двигателя является достижение интегрального значения тяги, то при разработке циклограммы его работы следует увеличивать массовый расход для перемещения точки с максимальной температурой дальше от входа в камеру.

Отмечено, что увеличение пористости среды позволяет увеличить размер «безопасной» области, при этом явно существует пороговое значение, при котором увеличение пористости приведет к снижению тепловыделения за счет химической реакции, то есть к росту синей зоны на рис. 6.

Отметим, что предложенные карты и регрессионые модели в большей степени служат для качественного представления влияния различных параметров работы двигателя на его работу. При реальной эксплуатации двигателя такие параметры, как начальная температура катализатора и пористость засыпки, изменяются во времени вследствие теплового нагрева, термоциклических нагрузок, а также возможного разрушения и спекания частиц засыпки [15]. Таким образом, для точного прогнозирования поведения фронта в условиях эксплуатации необходимо дополнить регрессионные модели или же расширить их до суррогатных, способных учитывать эти динамические изменения характеристик засыпки и условий её работы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Sutton G.P. History of Liquid Propellant Rocket Engines in the United States. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, vol. 19, no. 6, pp. 978-1007.

[2] Leverone F., Cervone A., Gill E. Cost analysis of solar thermal propulsion systems for microsatellite applications. *Acta Astronautica*, 2019, no. 155, pp. 90-110.

[3] Hou B., Wang X., Li T., Zhang T. Steady-state behavior of liquid fuel hydrazine decomposition in packed bed. *AIChE Journal*, 2015, vol. 61, pp. 1064-1080.

[4] Horgue P., Franc J., Guibert R., Soulaine C. An open-source toolbox for multiphase flow in porous media. *Computer Physics Communications*, 2015, vol. 187, pp. 217-226.

[5] Gao H.B., Zong S.C., Feng X.B., Zhang C.W.Two-dimensional numerical study of methane-air combustion within catalytic and non-catalytic porous medium. *Frontiers in Chemistry*, 2020, vol. 8, art. 511792.

[6] Guan J., Li G., Li H. Effect of catalytic bed porosity and mass flow rate on

decompositioт and combustion processes of a HAN-Based monopropellant thruster. *Vacuum*, 2021, vol. 194, no. 9, art. 110566.

[7] Abarbanel H. *The Analysis of observed chaotic data*. Springer, Science & Business Media, 1996, 272 p.

[8] Strogatz S.H. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Chapman and Hall/CRC, 2024, 616 p.

[9] 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, no. 12, art. 1111.

[10] Vafai K. *Handbook of porous medium*. Florida, CRC Press, 2015, 923 p.

[11] Бабкин В.С., Лаевский Ю.М. Фильтрационное горение газов. *Физика горения и взрыва*, 1987, т. 23, № 5, с. 27–44.

[12] Кабилов М.М., Садриддинов П. Б., Гулбоев Б.Дж., Холов О.А. Скорость стационарной волны фильтрационного горения газов при подобии полей температуры и концентрации. *Труды института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН*, 2017, т. 12, № 1, с. 27–32.

[13] James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. *An introduction to statistical learning*. New York, Springer, 2013, 426 p.

[14] Димитриенко Ю.И, Богданов И.О. Многомасштабное моделирование процессов фильтрации жидкого связующего в композитных конструкциях, изготавливаемых методом RTM. *Математическое моделирование и численные методы*, 2017, № 2, с. 3–27.

[15] McRight P., Popp C., Pierce C., Turpin A. Confidence testing of shell 405 and s-405 catalysts in a monopropellant hydrazine thruster. *41th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Tucson, AZ, 2005, art. AIAA-2005-3952.

Статья поступила в редакцию 04.05.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Цырендоржиев Э. С. Численное моделирование фильтрационного горения в камере сгорания термокаталитического ЖРДМТ на монотопливе. *Математическое моделирование и численные методы*, 2025, № 2, с. 130–144.

Цырендоржиев Эрдэни Сергеевич – научный сотрудник, АО ГНЦ «Центр Келдыша». e-mail: tsyrendorzhiev.es@gmail.com

Identification of operational parameters ensuring the stability of a monopropellant-fueled thermocatalytic liquid rocket engine

© E.S.Tsyrendorzhiev[1,2]

[1]Keldysh Research Center, Moscow, 125438, Russia
[2]MPIT, Phystech, Moscow, 117303, Russia

A numerical analysis was conducted to investigate the effect of monopropellant injection velocity on the position of the maximum interstitial gas temperature front in the combustion chamber of a low-thrust thermocatalytic liquid-propellant rocket engine using phase

portrait techniques. Quantitative maps of the front position and qualitative stability maps were obtained for homogeneous porous beds with different porosities. The parameters varied in the study include bed porosity, the initial bed temperature at the moment of engine start, and the fuel injection velocity into the combustion chamber. A regression model was developed to predict the front position, and the model was subsequently analyzed. Recommendations were formulated to ensure stable operation of the engine with a homogeneous catalytic bed.

***Keywords**: mathematical simulation, filtration combustion, heat-mass exchange, porous media, transient proccesses of combustion*

REFERENCES

[1] Sutton G.P. History of Liquid Propellant Rocket Engines in the United States. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, vol. 19, no. 6, pp. 978-1007.

[2] Leverone F., Cervone A., Gill E. Cost analysis of solar thermal propulsion systems for microsatellite applications. *Acta Astronautica*, 2019, no. 155, pp. 90-110.

[3] Hou B., Wang X., Li T., Zhang T. Steady-state behavior of liquid fuel hydrazine decomposition in packed bed. *AIChE Journal*, 2015, vol. 61, pp. 1064-1080.

[4] Horgue P., Franc J., Guibert R., Soulaine C. An open-source toolbox for multiphase flow in porous media. *Computer Physics Communications*, 2015, vol. 187, pp. 217-226.

[5] Gao H.B., Zong S.C., Feng X.B., Zhang C.W.Two-dimensional numerical study of methane-air combustion within catalytic and non-catalytic porous medium. *Frontiers in Chemistry*, 2020, vol. 8, art. 511792.

[6] Guan J., Li G., Li H. Effect of catalytic bed porosity and mass flow rate on decompositioт and combustion processes of a HAN-Based monopropellant thruster. *Vacuum*, 2021, vol. 194, no. 9, art. 110566.

[7] Abarbanel H. *The Analysis of observed chaotic data*. Springer, Science & Business Media, 1996, 272 p.

[8] Strogatz S.H. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Chapman and Hall/CRC, 2024, 616 p.

[9] 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, no. 12, art. 1111.

[10] Vafai K. *Handbook of porous medium*. Florida, CRC Press, 2015, 923 p.

[11] Babkin V.S., Laevsky Yu. M. Fil'tratsionnot gorenie gazov [Filtration combustion of gases]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1987, vol. 23, no. 5, pp. 27–44.

[12] Kabilov M.M., Sadriddinov P.B., Gulboev B.Dzh., Kholov O.A. Skorost' fil'tratsionnoi volny fil'tratisionnogo goreniya gazov pri podobii polei temperatury i koncentracii [Filtration wave velocity in filtration combustion under similarity of temperature and concentration fields]. *Trudy instituta mekhaniki im. P.P.Mavlyutova Ufimskogo nauchnogo centra RAN*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 27–32.

[13] James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. *An introduction to statistical learning*. New York, Springer, 2013, 426 p.

[14] Dimitrienko Yu.I, Bogdanov I.O. Multiscale modeling of liquid filtration process in composite structures manufactured by RTM. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2017, no. 2, pp. 3–27.

[15] McRight P., Popp C., Pierce C., Turpin A. Confidence testing of shell 405 and s-405 catalysts in a monopropellant hydrazine thruster. *41th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Tucson, AZ, 2005, art. AIAA-2005-3952.

Tsyrendorzhiev E.S., Research Associate, Keldysh Research Center. e-mail: tsyrendorzhiev.es@gmail.com