

Научная статья

УДК 621.45.02 + 662.612.2

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182570>

## ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ С ПРОДУКТАМИ РАЗЛОЖЕНИЯ РЕЗИНОПОДОБНОГО ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА В ОБЪЕМЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ РДТТ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСХОДА И СОПЛА

Руслан Айратович Шайдуллин<sup>1✉</sup>, Андрей Наилевич Сабирзянов<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ им. А.Н. Туполева,  
Казань, Республика Татарстан, Россия

<sup>1</sup> [samsankimanki@bk.ru](mailto:samsankimanki@bk.ru)

<sup>2</sup> [ANSabirzyanov@kai.ru](mailto:ANSabirzyanov@kai.ru)

**Аннотация.** Рассматриваются результаты исследований влияния взаимодействия продуктов сгорания твердого топлива перхлорат аммония/полибутадиеновый каучук 84/16 с продуктами разложения резиноподобного теплозащитного материала на коэффициент расхода и коэффициент сопла в составе гипотетического ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) с зарядом, горящим по торцевой поверхности. Исследование проводилось посредством газодинамического моделирования химически реагирующей среды продуктов сгорания твердого топлива в осесимметричном приближении. Определена тенденция изменения коэффициента расхода при вдуве газофазных и твердофазных продуктов разложения резиноподобного теплозащитного материала. Проведена оценка изменения коэффициента совершенства процессов в камере сгорания. Представлены профили и поля параметров потока в минимальном сечении, на срезе сопла и в продольном сечении РДТТ. Приведены результаты исследования, и обсуждены изменения коэффициента сопла при вдуве продуктов разложения резиноподобного теплозащитного материала.

**Ключевые слова:** твердое топливо, горение, кинетические механизмы, моделирование, резиноподобное теплозащитное покрытие, продукты разложения, коэффициент расхода, коэффициент сопла

**Для цитирования:** Шайдуллин Р.А., Сабирзянов А.Н. Влияние взаимодействия продуктов сгорания с продуктами разложения резиноподобного теплозащитного материала в объеме камеры сгорания РДТТ на коэффициенты расхода и сопла // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 158–168. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182570>

Original article

## THE EFFECT OF COMBUSTION PRODUCTS INTERACTION WITH DECOMPOSITION PRODUCTS OF THE RUBBER-LIKE HEAT-PROTECTIVE MATERIAL IN THE SRE COMBUSTION CHAMBER VOLUME ON THE FLOW RATE AND NOZZLE COEFFICIENTS

Ruslan A. Shaidullin<sup>1✉</sup>, Andrei N. Sabirzyanov<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev,  
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

<sup>1</sup> [samsankimanki@bk.ru](mailto:samsankimanki@bk.ru)

<sup>2</sup> [ANSabirzyanov@kai.ru](mailto:ANSabirzyanov@kai.ru)

© Шайдуллин Р.А., Сабирзянов А.Н., 2024

### Abstract

The article considers the results of the studies on the effect of interaction of the ammonium perchlorate/84/16 polybutadiene rubber resin solid fuel combustion products with decomposition products of the rubber-like heat protecting material on the flow-rate ration and nozzle coefficient as a part of the hypothetical solid fuel rocket engine with the charge burning along the butt surface. The study was being conducted by the gas-dynamic modeling of chemically reacting combustion products medium of solid fuel in the axisymmetric approximation. The amount of the blown-in decomposition products was being determined based on solving the system of the heat balance equations between the heat from combustion products and the heat absorbed by the thermal protection material.

The authors demonstrated the character of the change in the mass flow rate coefficient at blowing-in decomposition products of thermal protection material in the combustion chamber for gas and solid phases. Due to the fact that the endothermic reactions are being observed in the combustion chamber, the temperature of the mixture products decreases, reducing potential energy. While the soot particles blowing-in, almost linear growth of the mass flow rate coefficient is being observed, even with a substantial decrease in temperature.

A drastic temperature drop is being observed in the combustion chamber, thus the perfection coefficient of the processes in the combustion chamber falls. The article demonstrates the difference between accounting for the gas phase and the solid one. The soot particles take off the heat for heating to the mixture temperature, which explains the additional perfection coefficient degradation of the processes in the combustion chamber. The article presents the temperature profiles in various sections of a hypothetical SRE and gradients of parameters in the flow.

The potential energy reduction in the combustion chamber negatively affects the nozzle coefficient, i.e. the specific impulse losses increase due to blow-in. The article demonstrates the tendency of nozzle coefficient change with intensity increasing of blowing-in into the combustion products stream of solid propellant based on ammonium perchlorate and hydroxyl-terminated polybutadiene. The presence of soot particles up to 5% by mass of the combustion products flow predetermines losses in the specific impulse due to the two-phase flow of no more than 1.5%.

The article deliberates the results of specific impulse loss coefficients and mass flow rate coefficient variation, as well as theoretical judgments on the thrust changing of the SRE inner loop. The authors define the main reasons for the nozzle coefficient and mass flow rate coefficient decrease. The article presents as well the changes in the mole fraction of certain individual substances in the minimal section and at the nozzle edge.

**Keywords:** solid fuel, combustion, kinetic mechanisms, modeling, rubber-like thermal protection, decomposition products, flow rate coefficient, nozzle coefficient

**For citation:** Shaidullin R.A., Sabirzyanov A.N. The Effect of Combustion Products Interaction with Decomposition Products of the Rubber-Like Heat-Protective Material in the SRE Combustion Chamber Volume on the Flow Rate and Nozzle Coefficients. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 158-168. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182570>

---

### Введение

В камере сгорания (КС) ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) в качестве теплозащитного покрытия (ТЗП) часто используются резиноподобные материалы на основе каучука, совместимого с рецептурой применяемого твердого топлива (ТТ). При термическом нагреве ТЗП происходит разложение резиноподобного материала с выделением газовых, конденсированных и твердых веществ. При достижении температуры разложения связующего происходит выделение газов пиролиза с поверхности ТЗП. Дальнейший нагрев способствует образованию сажи/кокса, не реагирующего остатка, которые, в свою очередь, могут как оседать на поверхности ТЗП, так и отрываться от поверхности под действием газодинамических сил и покидать КС РДТТ. Над рабочей поверхностью ТЗП образуется пористый обугленный слой, который под

воздействием физико-химических процессов отрывается и уносится с поверхности ТЗП. При очень высоких температурах также возможно испарение минеральных наполнителей, а при сверхвысоких температурах – и углерода [1].

В зависимости от составов газов пиролиза ТЗП и продуктов сгорания продукты абляции резиноподобного ТЗП в объеме КС могут способствовать появлению дополнительных потерь преобразования энергии в РДТТ [2, 3], что связано во многом с термохимическими процессами. Взаимодействие продуктов сгорания с продуктами пиролиза ТЗП, вдуваемыми с дозвуковой поверхности утопленного сопла, рассматривалось в работе [4]. Исследование заключалось в оценке изменений параметров потока и коэффициента расхода сопла РДТТ совместно с учетом химических превращений в газовой фазе при вдуве газифицированных про-

дуктов разложения фенолформальдегидной смолы. Результаты работы показали негативное влияние на коэффициент расхода для эллипсоидного дозвукового контура при взаимодействии продуктов разложения с продуктами сгорания ТТ на основе перхлората аммония (АР – Ammonium Perchlorate) и полибутadiensового каучука с гидроксильными концевыми группами (НТРВ – Hydroxyl-terminated Polybutadiene) АР/НТРВ 80/20.

В широко распространенной литературе, например [5], описана тенденция увеличения потерь удельного импульса на 0,5% при добавлении к смеси продуктов сгорания 1% продуктов разложения ТЗП.

В работе [2] представлены потери удельного импульса из-за подвода продуктов разложения ТЗП до 8% по массе к расходу ТТ, где исследовалась топливная пара на основе АР/АI 82/18 посредством термодинамического приближения. Основные результаты работы сообщали о потерях удельного импульса не более 3,5 % для растрюба сопла  $\bar{D} = r_a/r_{min} = 3$ , где  $r_a$  и  $r_{min}$  – радиусы среза сопла и минимального сечения. Согласно термодинамической оценке, потери тепловой энергии смеси для данного ТТ соответствуют вдуву продуктов разложения ТЗП, включающих в состав в основном СО и СО<sub>2</sub>. Взаимодействие продуктов сгорания с такими вдуваемыми индивидуальными веществами, как СН<sub>4</sub> и Н<sub>2</sub>, способствуют увеличению температуры пламени и, соответственно, увеличению удельного импульса.

В статье рассматриваются результаты исследования взаимодействий продуктов сгорания ТТ АР/НТРВ 84/16 [6, 7] с продуктами разложения резиноподобного ТЗП в объеме КС, полученные посредством газодинамического моделирования с учетом химических превращений в осесимметричной постановке. Предметом исследования являются коэффициенты расхода и сопла. Объект исследования – гипотетический РДТТ.

### Методология

Существует обширное множество компоновок корпуса КС и ТТ в РДТТ, например канально-щелевые заряды, прочно скрепленные со стенками корпуса КС, как предполагалось в работе [4]. В данной работе рассматривался гипотетический РДТТ с зарядом ТТ, горение которого происходит по торцевой поверхности. Схематично рассматриваемый гипотетический РДТТ изображен на рис. 1, основные геометрические параметры которого следующие:  $\bar{F} = F_a/F_{min} = 8,6$ , где  $F_a$  и  $F_{min}$  – площади среза сопла и минимального сечения;  $R_2 = 4r_{min}$ ;  $R_1 = 1,5r_{min}$ ;  $D_k/r_{min} = 18,2$ ;  $\theta = 37^\circ$ ;  $\beta = 17^\circ$ . Выбрано несколько вариантов имитации выгорания заряда совместно с открытием большей активной поверхности ТЗП

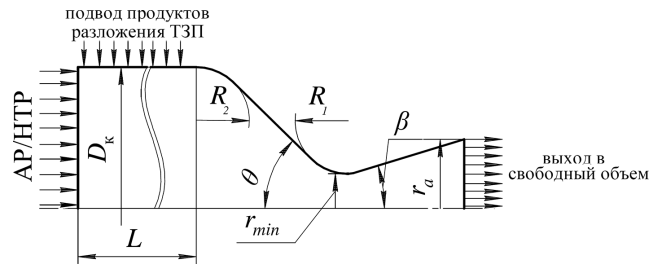


Рис. 1. Схема гипотетического двигателя с зарядом торцевого горения

( $L/D_k = 3,6; 7,15; 11$ ), что позволяет определить тенденцию изменения коэффициентов расхода и сопла.

В качестве резиноподобного ТЗП принят материал [1] со следующими основными характеристиками: средняя теплоемкость при термическом разложении,  $c_{p\ TЗП} = 2015$  Дж/кг·К; средняя теплопроводность,  $\lambda_{ТЗП} = 0,22$  Вт/м·К. В работе [1] предполагалось, что в общем случае материал ТЗП включал в себя полимерную матрицу, частицы диоксида кремния, технический углерод и углеродные волокна. Условная формула каучука  $C_{52}H_{102}$ ; массовая доля неразлагающегося наполнителя 0,23; коксовое число 0,24. По результатам исследования [1], более половины углерода улетучивается вместе с газовой фазой в виде сажи, другая оседает на поверхности ТЗП. Доля углерода, осаждающегося на поверхности обугленного слоя, составляет 0,46. В качестве основных компонентов в продуктах разложения этиленпропиленового каучука учитывались СН<sub>4</sub>, С(s), Н<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>, Н, содержание которых получено посредством термодинамических расчетов в диапазоне температур от 600 К до 3600 К. В настоящей работе также предполагалась оценка влияния всей уносимой массы посредством включения в газодинамическое моделирование нереагирующих частиц С(s) с размером 1000 мкм. Подобное усложнение модели обусловлено попыткой сравнения влияния твердой фазы на коэффициент расхода и коэффициент сопла РДТТ, другие размеры частиц кокса/сажи не рассматривались. Предполагалось, что при учете твердой фазы вдув газообразных продуктов разложения ТЗП соответствовал тем же значениям при  $L/D_k$ , как и без учета сажи, т.е. добавлялся лишь расход кокса с поверхности в соответствии с массовым потоком уносимого ТЗП  $\dot{m}_{ун}$ .

Взаимосвязь теплообмена между резиноподобным ТЗП и продуктами сгорания ТТ описывалась в соответствии с тепловым балансом между тепловым потоком от продуктов сгорания  $q$  и поглощаемым теплом ТЗП с учетом затрат на преобразования газообразных продуктов разложения  $q_{ТЗП}$ . При допущениях, что вдув газа соответствует критиче-



где  $c_{p,i}$  – теплоемкость окислителя/горючего вещества;  $g_i$  – массовые доли окислителя/горючего в твердом топливе;  $T_{\text{плав}}$  – температура плавления окислителя/горючего;  $T_s$  – температура поверхности твердого топлива (на разделе конденсированной и газовой фаз);  $Q_c$  – тепловыделение энергии в конденсированной фазе монотоплива; индексы «тв» и «ж» относятся к характеристикам твердой и жидкой фаз твердого топлива. Для  $T_{\text{нач}} = 298 \text{ K}$  для АР/НТРВ 84/16 отвод тепла приблизительно  $Q \approx 13 \text{ кВт}$ . Теплофизические свойства АР и НТРВ возможно определить из работы [11].

Механизм М.Л. Гросса проверялся в приближении реактора идеального смешения (PSR – Perfectly Stirred Reactor) [13–15] посредством программного комплекса ANSYS Chemkin-Pro (см. рис. 3). Термодинамические свойства индивидуальных веществ принимались в соответствии с базами данных Janaf, NASA и А. Бурката [16–18]. Газодинамическое моделирование проводилось в осесимметричной постановке посредством программы ANSYS Fluent, модель аналогична применяемой в работах [4, 19]. Метод расчета основан на неявной схеме решения с применением не менее второго порядка точности пространственной дискретизации. Для уравнения энергии определен четвертый порядок точности. В качестве модели турбулентности использовалась модель  $k-\omega$  SST [20] с типовым набором модельных констант. Для моделирования процессов горения в условиях РДТТ в работе [19] представлено частичное сравнение результатов, полученных по модели конечной скорости объемной реакции Finite-Rate и модели Eddy-Dissipation Concept (EDC), основанной на предположении, что химические реакции происходят в областях рассеивания энергии [21]. При использовании модели EDC

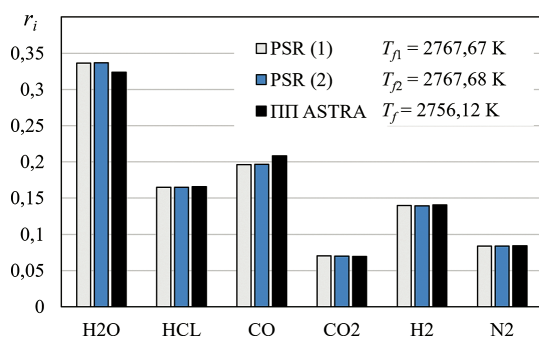


Рис. 3. Результаты моделирования пламени АР/НТРВ 84/16 ( $p = 70 \text{ атм}$ ):  
 PSR (1) – механизм Гросса;  
 PSR (2) – механизм Пудуппаккама с поправками Таннера;  
 ПП ASTRA – предельное термодинамическое равновесие

в результатах наблюдались малые градиенты температуры и индивидуальных веществ вблизи поверхности горящего ТТ, поэтому в настоящей работе использовалась модель Finite-Rate. Модели горения ограничивались типовыми настройками. На основании проведенного анализа [19], исходя из точности расчета и вычислительных ресурсов, оптимальным временным шагом является  $\Delta t = (1-10) \cdot 10^{-6} \text{ с}$ , в данной работе временной шаг принимался  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . В связи с невысокими температурами среды энергиями электронного возбуждения и ионизации пренебрегали. Для движения нереагирующих частиц сажи вдоль дозвуковой стенки применялась модель wall-jet [22], основанная на теории Набера–Рейтца [23], определяющая скорости и направления частиц по результирующему потоку импульса в невязкой среде. В связи с тем, что в газодинамическом моделировании применялись адиабатные непроницаемые стенки контура сопла и проницаемая стенка, имитирующая подвод продуктов разложения ТЗП, радиационный теплообмен учитывался только аналитически для определения теплового баланса на границе ТЗП.

Коэффициент расхода сопла  $\mu_c$  определялся в соответствии с уравнением

$$\mu_c = \frac{\dot{m}}{A(k)p_0 F_{\text{min}} / \sqrt{RT_0}},$$

где  $A(k) = \sqrt{k} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$ ;  $\dot{m}_{\text{yh}}$  – расход продуктов сгорания;  $p_0$  – давление торможения в минимальном сечении;  $R$  – газовая постоянная продуктов сгорания;  $T_0$  – температура торможения продуктов сгорания в минимальном сечении;  $k$  – среднее значение отношения теплоемкостей продуктов сгорания на входе и в минимальном сечении сопла.

Пренебрегая оценкой потерь удельного импульса из-за двухфазности потока, рассеивания, трения, которые подробно рассматриваются в многих работах, например [24], изменение коэффициента сопла  $\Phi_{c \text{ вл}}$  с учетом вдува можно провести с помощью уравнения

$$\Phi_{c \text{ вл}} = w_{a \text{ вл}} / w_a,$$

где  $w_a, w_{a \text{ вл}}$  – скорость на срезе сопла без учета вдува и с учетом вдува.

Коэффициент совершенства процессов в КС  $\Phi_\beta$ :

$$\Phi_\beta = p_k^p \dot{m}_T / p_k^T \dot{m}_p,$$

где  $p_k$  – давление в камере сгорания; индексы «Т» и «р» относятся к теоретическим и расчетным значениям, полученным посредством моделирования в осесимметричном приближении.

**Результаты и обсуждения**

Согласно термодинамическому расчету [1], в газофазных продуктах разложения резиноподобного ТЗП в большей степени присутствуют  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$ . В зависимости от их количества условная формула смеси существенно изменяется. Рецептура ТТ АР/НТРВ 84/16 приближена к стехиометрическому соотношению компонентов (стехиометрия АР/НТРВ 88/12), однако при введении в смесь углеводородов стехиометрическое соотношение изменяется в сторону обогащения смеси, что предопределяет снижение температуры рабочего газа. Уменьшение работоспособности газа негативно сказывается на коэффициенте совершенства процессов в камере сгорания для двух вариантов исследований (рис. 4). В приповерхностной зоне резиноподобного ТЗП имеется тенденция уменьшения температуры продуктов течения, которая сохраняется и в минимальном сечении (рис. 5). Профиль скорости в минимальном сечении слабо изменяется вне зависимости от количества вдува, что обусловлено плавным и классическим профилем дозвукового участка сопла (рис. 6). Вследствие эндотермических реакций в приповерхностной зоне ТЗП в объеме КС коэффициент расхода увеличивается незначительно и имеет уровень  $\mu_c \approx 1$  только для варианта учета газовой фазы; твердофазные продукты разложения и уноса резиноподобного ТЗП с поверхности стенок КС увеличивают коэффициент расхода почти пропорционально увеличению массы рабочего тела (рис. 7). Незначительное изменение коэффициента расхода  $\mu_c$  для газовой фазы обусловлено комбинациями изменений молекулярного веса, температуры торможения и давления смеси. Вследствие вдува  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$  молекулярный вес смеси снижается, вместе с этим из-за эндотермических реакций в КС уменьшаются температура и давление. Точка экстремума в данном случае определена при  $m_{\text{вд}}/\dot{m} \approx 0,01$ . Дальнейшее увеличение интенсивности вдува способствует большему снижению температуры и, как следствие, снижению  $\mu_c$ .

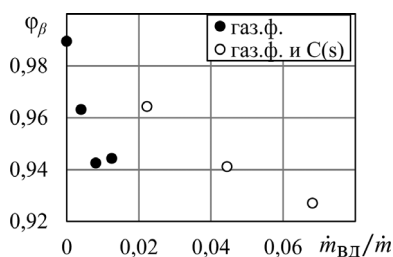


Рис. 4. Изменение коэффициента совершенства процессов в КС по мере выгорания ТТ и подвода дополнительной массы продуктов разложения резиноподобного ТЗП

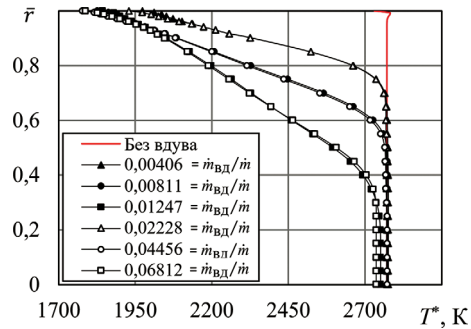


Рис. 5. Профиль температуры торможения в минимальном сечении сопла при вдуве продуктов разложения резиноподобного ТЗП в объеме КС

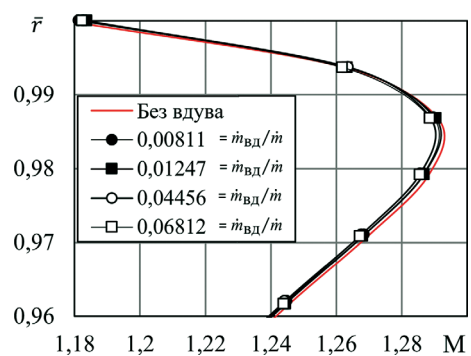


Рис. 6. Профили приведенной скорости в минимальном сечении сопла при вдуве продуктов разложения резиноподобного ТЗП в объеме КС

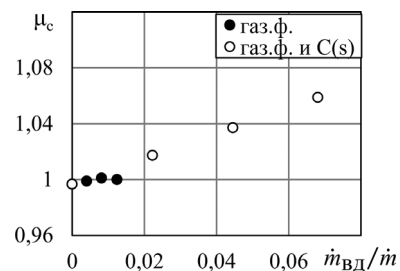


Рис. 7. Изменение коэффициента расхода при вдуве продуктов разложения резиноподобного ТЗП в объеме КС

Увеличение массы смеси в КС, проходящее через минимальное сечение сопла, способствует увеличению коэффициента расхода даже при существенном уменьшении температуры в приповерхностной зоне (рис. 8) ( $T \approx 1700-2767 \text{ K}$ ). В минимальном сечении сопла при увеличении подвода продуктов разложения резиноподобного ТЗП профили индивидуальных веществ смеси также изменяются, как это продемонстрировано ниже на примере молекулярного водорода и углекислого газа (рис. 9 и 10). В ядре потока в минимальном сечении сопла наблюдается равновесное

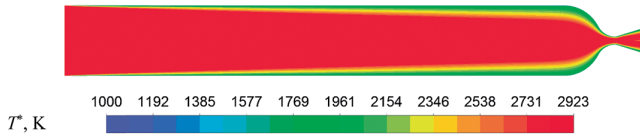


Рис. 8. Поле температуры торможения в продольном сечении гипотетического РДТТ ( $L/D_k = 7,15$ )

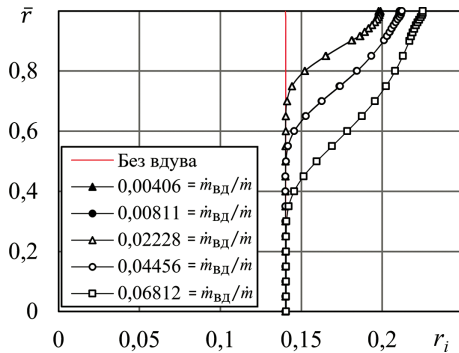


Рис. 9. Профили мольной доли  $N_2$  в минимальном сечении сопла при вдуве продуктов разложения резиноподобного ТЗП в объеме КС

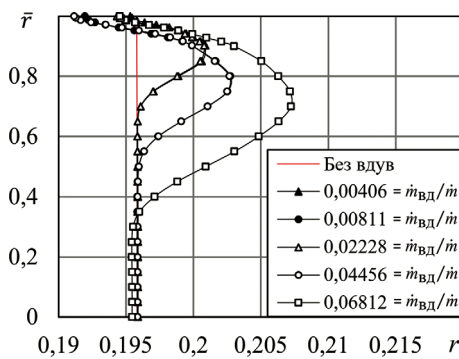


Рис. 10. Профили мольной доли  $CO$  в минимальном сечении сопла при вдуве продуктов разложения резиноподобного ТЗП в объеме КС

значение мольных долей продуктов сгорания. При увеличении массы вдува в приповерхностной зоне профили растягиваются вследствие химических превращений в объеме КС.

Реакции в приповерхностной зоне КС и сопла, сопровождающиеся затратами тепловой энергии, способствуют уменьшению потенциальной энергии в КС и уменьшению кинетической энергии на срезе сопла (рис. 11). На рис. 12 приведены профили приведенной скорости на срезе сопла. Число Маха определялось для газовой фазы (поправка для молекулярного веса  $\mu_\Gamma = \mu_{см}(1 - z)$ , где  $\mu_\Gamma$  и  $\mu_{см}$  — молекулярный вес газовой смеси и смеси двухфазного потока;  $z$  — массовая доля частиц в двухфазном потоке). За счет уменьшения температуры торможения в пристеночной зоне и, как следствие, уменьшения статической температуры

предопределяется меньшая скорость звука в потоке относительно варианта без вдува, что, в свою очередь, определяет большее значение приведенной скорости  $M$  при меньшей абсолютной скорости истечения из сопла. Траектории нереагирующих твердых частиц разложения ТЗП проходят вдоль цилиндрической стенки КС и дозвукового участка сопла. Вследствие инерционных сил частицы направляются к ядру потока в минимальном сечении и сохраняют траекторию вплоть до среза сопла, о чем также свидетельствует уменьшение скорости в осевой зоне (рис. 13). Уменьшение температуры торможения в минимальном сечении способствует уменьшению абсолютной скорости на срезе сопла по сравнению с вариантом без учета вдува (рис. 14). Существенное уменьшение температуры в минимальном сечении способствует организации работы сопла на режиме перерасширения, увеличивая потери коэффициента сопла. Увеличение массы продуктов разложения ТЗП вследствие эндотермических реакций способствует существенному уменьшению скорости на срезе сопла. Наличие твердотельных нереагирующих частиц продуктов разложения резиноподобного ТЗП, ограничиваясь постановкой задачи, определяет уменьшение скорости потока не более чем на 1,5 % (рис. 14) при максимальном исследуемом подводе продуктов разложения ТЗП ( $z = 0,05$ ) для газовой и твердой фаз и только газовой фазы (подвод газообразных продуктов разложения ТЗП одинаков). Уменьшение скорости потока из-за двухфазности смеси определялось относительно сравнения между вариантами вдув газа/вдув газа и сажи  $\dot{m}_{вд}/\dot{m}$ : 0,00406/0,02228; 0,00811/0,04456; 0,01247/0,06812.

Вследствие малого времени пребывания и геометрических размеров раструба сопла профили индивидуальных соединений изменяются незначительно (рис. 15 и 16). Как и в минимальном сечении,

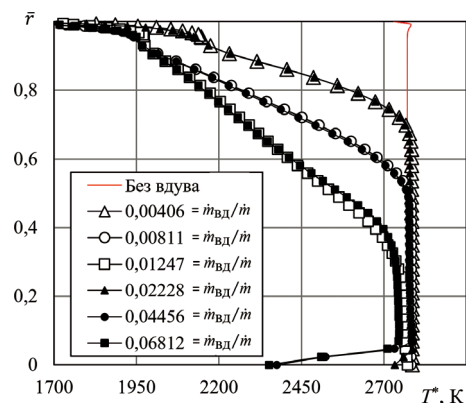


Рис. 11. Профили температуры торможения на срезе сопла при переменном количестве вдуваемых веществ  $\dot{m}_{вд}/\dot{m}$

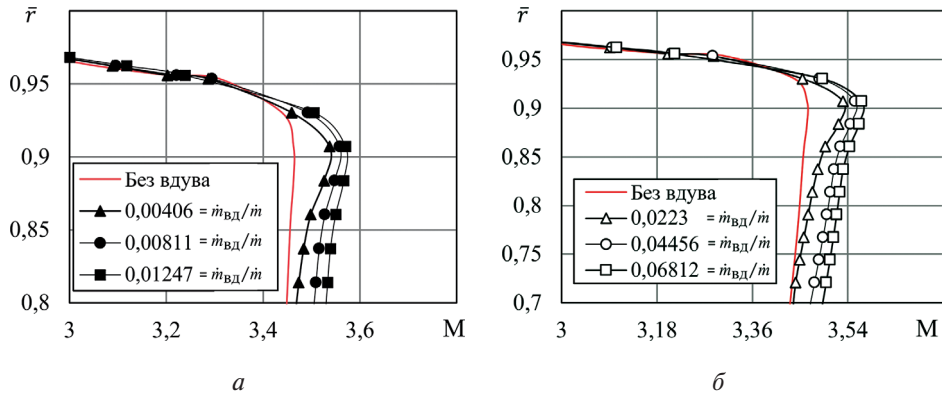


Рис. 12. Профили приведенной скорости в пристеночной зоне на срезе сопла при вдуве газообразных продуктов разложения (а) и при вдуве газообразных и твердотельных продуктов разложения резиноподобного ТЗП (б)

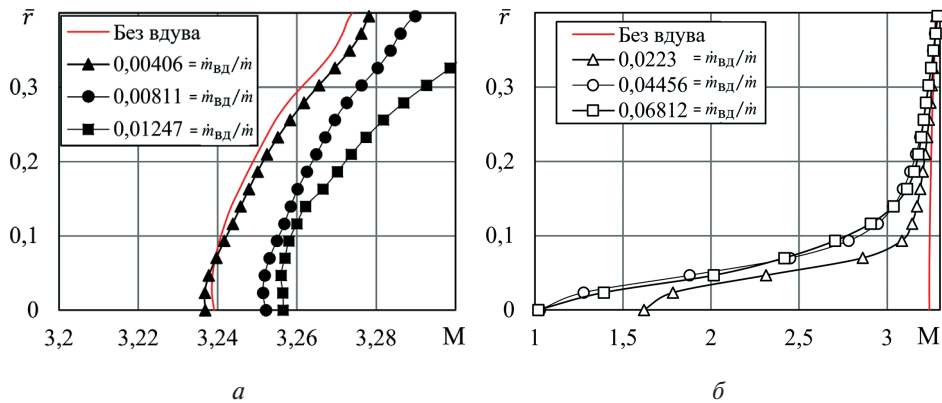


Рис. 13. Профили приведенной скорости в приосевой зоне на срезе сопла при вдуве газообразных (а) и при вдуве газообразных и твердотельных продуктов разложения резиноподобного ТЗП (б)

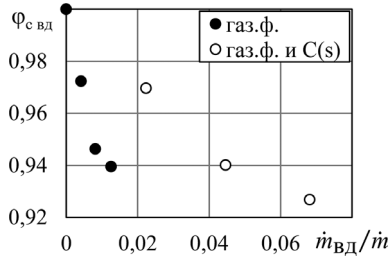


Рис. 14. Изменение коэффициента сопла вследствие вдува продуктов разложения резиноподобного ТЗП в КС

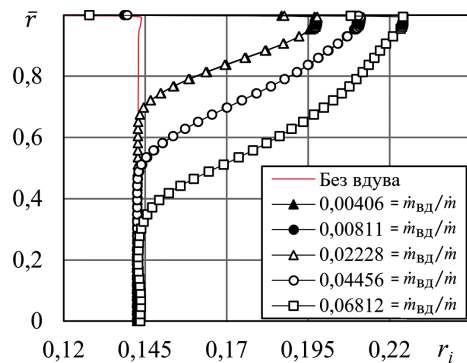


Рис. 15. Профили мольной доли H2 на срезе сопла при вдуве продуктов разложения резиноподобного ТЗП в объеме КС



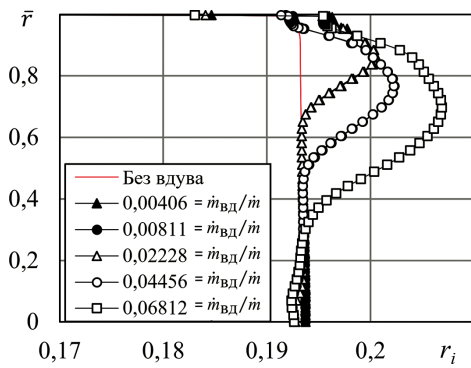


Рис. 16. Профили мольной доли CO на срезе сопла при вдуве продуктов разложения резиноподобного ТЗП в объеме КС

на срезе сопла в пристеночной зоне вследствие вдува и реакций продуктов сгорания с продуктами разложения резиноподобного ТЗП в объемах КС и дозвуковой части сопла присутствует искажение профилей индивидуальных веществ. Содержание в продуктах разложения резиноподобного ТЗП  $\text{CH}_4$  способствует плавному переходу углеводорода в продукты сгорания  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  в приповерхностной зоне на срезе сопла.

Теоретически, если при совместном взаимодействии продуктов разложения ТЗП и продуктов сгорания температура торможения смеси изменяется незначительно [2, 5] или увеличивается, то вдув продуктов ТЗП будет способствовать малому изменению или увеличению коэффициента сопла за исключением случаев увеличения потерь удельного импульса из-за двухфазности потока. Увеличение коэффициента расхода и незначительное изменение коэффициента сопла вследствие вдува продуктов разложения ТЗП в объеме КС будет определять увеличение тяги внутреннего контура РДТТ. Определяющим фактором в данном случае является температура торможения смеси, существенное уменьшение которой способствует интенсивному уменьшению коэффициента сопла и, соответственно, увеличению потерь тяги внутреннего контура РДТТ.

### Выводы

Увеличение массы продуктов разложения ТЗП способствует уменьшению коэффициента совершенства, обусловленное существенным уменьшением интегральной температуры продуктов течения на выходе из КС гипотетического РДТТ. Вылет сажи с поверхности ТЗП, имеющей температуру в соответствии с температурой вдува, способствует дополнительным затратам энергии на разогрев частиц до температуры смеси в минимальном сечении сопла, что обуславливает дополнительные потери

температуры и, соответственно, потенциальной энергии смеси.

Существенный подвод газифицированных продуктов разложения ТЗП способствует определению коэффициента расхода  $\mu_c \approx 1$  даже при уменьшении интегральной температуры торможения на 350 К. При дополнительном подводе нереагирующих твердотельных частиц, вылетающих с поверхности ТЗП, коэффициент расхода увеличивается почти линейно увеличению массы вдува в рамках гипотетического РДТТ с зарядом, горящим по торцевой постоянной поверхности.

Уменьшение коэффициента сопла за счет вдува во многом объясняется уменьшением потенциальной энергии в КС РДТТ, как следствие уменьшений температуры и коэффициента совершенства процессов в КС. Введение нереагирующих частиц сажи способствует несильному увеличению потерь из-за двухфазности потока (не более 1,5 % при  $z = 0,05$ ). Согласно представленным закономерностям, при уменьшении температуры в приповерхностной зоне КС за счет взаимодействия продуктов сгорания и разложения ТЗП коэффициент сопла может уменьшиться даже при введении низкомолекулярного состава газов пиролиза.

### Список источников

1. Страхов В.Л., Атаманов Ю.М., Кузьмин И.А., Бакулин В.Н. Математическое моделирование высокотемпературных теплофизических характеристик резиноподобных теплозащитных материалов // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 4. С. 528–536. DOI: 10.7868/S0040364417040226
2. Губертов А.М., Миронов В.В., Борисов Д.М. и др. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / Под ред. А.С. Коротева. — М.: Машиностроение, 2004. — 512 с.
3. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. — М.: Машиностроение, 1989. — 240 с.
4. Сабирзянов А.Н., Шайдуллин Р.А. Влияние некоторых факторов разложения теплозащитного материала на коэффициент расхода утопленного сопла // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 85–92.
5. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей: Учеб. / Под ред. В.П. Глушко. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1989. — 462 с.
6. Соколов Б.И., Черенков А.С., Салоньков А.И. Термодинамические и теплофизические свойства твердых ракетных топлив и их продуктов сгорания / Под ред. В.Е. Алемасова. — М.: Министерство обороны СССР, 1977. — 318 с.
7. Суржиков С.Т., Краер Х. Вычислительные модели горения неметаллизируемого гетерогенного ракетного

- топлива // Теплофизика высоких температур, 2003. Т. 41. № С. 106–142. DOI: 10.1023/A:1022336923486
8. Леонтьев А.И., Луцкич В.Г., Макарова М.С. Коэффициент восстановления температуры в пограничном слое на проницаемой пластине // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 2. С. 255–261. DOI: 10.7868/S0040364417020089
  9. Gross M.L. Two-dimensional modeling of AP/HTPB utilizing a vorticity formulation and one-dimensional modeling of AP and AND. PhD Theses and Dissertations, Department of Chemical Engineering, Brigham Young University, Provo, UT, 2007. – 244 p.
  10. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах: Учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. – 40 с.
  11. Tanner M.W. Multidimensional Modeling of Solid Propellant Burning Rates and Aluminum Agglomeration and One-Dimensional Modeling of RDX/GAP and AP/HTPB. PhD Theses and Dissertations, Brigham Young University, 2008. – 244 p.
  12. Smyth D.A. Modeling solid propellant ignition events. PhD Theses and Dissertations, Department of Chemical Engineering, Brigham Young University, Provo, UT, 2011. – 202 p.
  13. Spalding D.B. Combustion and mass transfer a textbook with multiple-choice exercises for engineering students. – New York: Elsevier, 1979. – 418 p.
  14. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion: Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation. – 4th edition. – New York: Springer, 2006. – 390 p. DOI: 10.1007/978-3-540-45363-5
  15. Gardiner W.C. Jr. Combustion chemistry. – New York: Springer-Verlag, Softcover reprint of the original 1st ed. 1984 edition (2012). – 522 p.
  16. Malcolm W.C. Jr. Nist-Janaf Thermochemical Tables. – 4th ed. – American Institute of Physics, 1998. – 1951 p.
  17. Burcat A., Gardiner W.C. Jr. Ideal Gas Thermochemical Data for Combustion and Air Pollution Use // In: Gardiner W.C. (eds) Gas-Phase Combustion Chemistry. Springer, New York, NY, 2000, pp. 489–538. DOI: 10.1007/978-1-4612-1310-9\_5
  18. Burcat A., Ruscic B. Third millennium ideal gas and condensed phase thermochemical database for combustion with updates from active thermochemical tables. ANL-05/20. TAE 960. – Chicago: The University of Chicago, 2005. – 418 p. DOI: 10.2172/925269
  19. Шайдудлин P.A., Сабирзянов А.Н. Моделирование горения твердого топлива на основе перхлората аммония и полибутадиена в условиях гипотетического двигателя // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 6. С. 276–287. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-6-276-287
  20. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulent Models for Engineering Applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. No. 8, pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149
  21. Gran I.R., Magnussen B.F. A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame. Part 2. Influence of combustion modeling and finite-rate chemistry // Combustion Science and Technology. 1996. Vol. 119, pp. 191–217. DOI: 10.1080/00102209608951999
  22. ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS, Inc. Southpointe, 2021. – 1026 p.
  23. Naber J.D., Reitz R.D. Modeling Engine Spray/Wall Impingement. SAE Technical Paper 880107, 1988. – 26 p. DOI: 10.4271/88010
  24. Бирюков В.И., Кочетков Ю.М., Зенин Е.С. Определение потерь удельного импульса тяги из-за химической неравновесности в энергоустановках летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 42–49.

## References

1. Strakhov V.L., Atamanov Yu.M., Kuz'min I.A., Bakulin V.N. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 528–536. DOI: 10.7868/S0040364417040226
2. Gubertov A.M., Mironov V.V., Borisov D.M. et al. *Gazodinamicheskie i teplofizicheskie protsessy v raketnykh dvigatelyakh tverdogo topliva* (Gas-dynamic and thermophysical processes in solid fuel rocket engines), Moscow, Mashinostroenie, 2004, 512 p.
3. Shishkov A.A., Panin S.D., Romyantsev B.V. *Rabochie protsessy v raketnykh dvigatelyakh tverdogo topliva. Spravochnik* (Working processes in solid fuel rocket engines. Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 240 p.
4. Sabirzyanov A.N., Shaidullin R.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsonnaya tekhnika*, 2023, no. 3, pp. 85–92.
5. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P. *Teoriya raketnykh dvigatelei* (Theory of rocket engines). 4th ed. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 462 p.
6. Sokolov B.I., Cherenkov A.S., Salonykov A.I. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva tverdykh raketnykh topliv i ikh produktov sgoraniya* (Thermodynamic and thermophysical properties of solid rocket fuels and their combustion products), Moscow, Ministerstvo oborony SSSR, 1977, 318 p.
7. Surzhikov S.T., Krier H. Computational Models of Combustion of Nonmetallized Heterogeneous Propellant. *High Temperature*, 2003, vol. 41, pp. 95–128. DOI: 10.1023/A:1022336923486
8. Leont'ev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2017, vol. 55, no. 2, pp. 255–261. DOI: 10.7868/S0040364417020089
9. Gross M.L. *Two-dimensional modeling of AP/HTPB utilizing a vorticity formulation and one-dimensional modeling of AP and AND*. PhD Theses and Dissertations, Department of Chemical Engineering, Brigham Young University, Provo, UT, 2007, 244 p.

10. Trusov B.G. *Modelirovanie khimicheskikh i fazovykh ravnovesii pri vysokikh temperaturakh* (Modeling of chemical and phase equilibria at high temperatures), Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1991, 40 p.
11. Tanner M.W. *Multidimensional Modeling of Solid Propellant Burning Rates and Aluminum Agglomeration and One-Dimensional Modeling of RDX/GAP and AP/HTPB*. PhD Theses and Dissertations, Brigham Young University, 2008, 244 p.
12. Smyth D.A. *Modeling solid propellant ignition events*. PhD Theses and Dissertations, Department of Chemical Engineering, Brigham Young University, Provo, UT, 2011, 202 p.
13. Spalding D.B. *Combustion and mass transfer a textbook with multiple-choice exercises for engineering students*. New York, Elsevier, 1979, 418 p.
14. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Combustion: Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation*. 4th ed. New York, Springer, 2006, 390 p. DOI: 10.1007/978-3-540-45363-5
15. Jr. Gardiner W.C. *Combustion chemistry*. New York, Springer-Verlag, Softcover reprint of the original 1st ed. 1984 edition (2012), 522 p.
16. Jr. Malcolm W.C. *Nist-Janaf Thermochemical Tables*. 4th ed. American Institute of Physics, 1998, 1958 p.
17. Burcat A., Jr Gardiner W.C. Ideal Gas Thermochemical Data for Combustion and Air Pollution Use. In: Gardiner W.C. (eds) *Gas-Phase Combustion Chemistry*. Springer, New York, 2000, pp. 489–538. DOI: 10.1007/978-1-4612-1310-9\_5
18. Burcat A., Ruscic B. *Third millennium ideal gas and condensed phase thermochemical database for combustion with updates from active thermochemical tables*. ANL-05/20. TAE 960. Chicago, The University of Chicago, 2005, 418 p. DOI: 10.2172/925269
19. Shaidullin R.A., Sabirzyanov A.N. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2023, vol. 15, no. 6, pp. 276–287. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-6-276-287
20. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulent Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149
21. Gran I.R., Magnussen B.F. A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame. Part 2. Influence of combustion modeling and finite-rate chemistry. *Combustion Science and Technology*, 1996, vol. 119, pp. 191–217. DOI: 10.1080/00102209608951999
22. *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS, Inc. Southpointe, 2021, 1026 p.
23. Naber J.D., Reitz R.D. *Modeling Engine Spray/Wall Impingement*. SAE Technical Paper 880107, 1988, 26 p. DOI: 10.4271/880107
24. Biruykov V.I., Kochetkov Yu.M., Zenin E.S. Determination of thrust specific impulse losses occurring due to chemical non-equilibrium in aircraft power plant. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 42–49.

Статья поступила в редакцию 20.06.2024; одобрена после рецензирования 10.09.2024; принята к публикации 10.09.2024.  
The article was submitted on 20.06.2024; approved after reviewing on 10.09.2024; accepted for publication on 10.09.2024.