

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.453/.457

Программные комплексы для теплового расчета химико-термических ракетных двигателей

Г.В. Белов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Software packages for thermal calculation of chemical rocket engines

G.V. Belov

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены программные комплексы, предназначенные для термодинамического моделирования процессов, происходящих в камерах химико-термических ракетных двигателей. Программный комплекс включает в себя программу теплового расчета, иногда вспомогательные программы и базу данных по термодинамическим свойствам продуктов сгорания. Выполнен анализ алгоритмов расчета равновесного состава продуктов сгорания. Тепловой расчет химико-термического ракетного двигателя содержит термодинамическую и газодинамическую составляющие. С помощью термодинамического расчета определяют равновесный состав продуктов сгорания, температуру адиабатного горения, энтропию, энтальпию, теплоемкость, скорость звука, показатель изоэнтропы и т. д. в трех сечениях камеры ракетного двигателя. На основании результатов термодинамического расчета находят скорость потока, удельный импульс, расходный комплекс и другие характеристики. Показано, что в большинстве соответствующих программных комплексов использован алгоритм теплового расчета, разработанный в NASA. Основными источниками информации о термодинамических свойствах продуктов сгорания являются справочники «Термодинамические свойства индивидуальных веществ» и NIST-JANAF.

EDN: RTUVYT, <https://elibrary/rtuvyt>

Ключевые слова: химико-термический ракетный двигатель, продукты сгорания, термодинамическое моделирование

Software packages designed for thermodynamic simulation of processes in chambers of thermochemical rocket engines are considered. The software package usually includes a thermal calculation program and a database on the thermodynamic properties of combustion products. The analysis of algorithms for calculating the equilibrium composition of combustion products is carried out. The thermal calculation of a thermochemical rocket engine contains two components, namely thermodynamic and gas-dynamic. As a result of thermodynamic calculation, the equilibrium composition of the combustion products, the adiabatic flame temperature, entropy, enthalpy, heat capacity, speed of sound, adiabatic exponent, etc. of the combustion products in three sections of the chamber of the rocket en-

gine is determined. Further, based on the results of thermodynamic calculations, the flow velocity, specific impulse, characteristic velocity, and other parameters are determined. It is shown that the thermal calculation algorithm developed at NASA is the most popular for thermodynamic modeling of processes in chambers of thermochemical rocket engines. The main sources of information on the thermodynamic properties of combustion products are the Thermodynamic properties of individual substances and NIST-JANAF reference books.

EDN: RTUVYT, <https://elibrary.ru/tuvyt>

Keywords: thermochemical rocket engine, combustion products, thermodynamic simulation

Термодинамический расчет равновесного состава и свойств продуктов сгорания (ПС) ракетного топлива является важным этапом проектирования химико-термического ракетного двигателя (ХТРД). Чтобы определить основные характеристики модельного ХТРД, необходимо рассчитать равновесный состав и свойства ПС в трех сечениях: на входе в сопло, в критическом сечении и на срезе сопла. Расчет первого сечения выполняют при заданных значениях давления в камере сгорания и энтальпии топлива, а второго и третьего — в предположении об изэнтропном расширении. Для критического сечения требуется определить параметры состояния ПС, обеспечивающие равенство скорости потока и местной скорости звука. Расчет состава ПС на срезе сопла проводят при заданном давлении ПС.

Цель работы — анализ алгоритмов расчета равновесного состава ПС и программных комплексов, в которых эти алгоритмы реализованы.

Алгоритмы расчета равновесного состава ПС.

Первые алгоритмы и программные комплексы для теплового расчета ХТРД, снабженные базами данных (БД) по термодинамическим свойствам веществ были разработаны в 1960-е годы в СССР [1] и США [2]. В работе [1] для расчета состава ПС использован метод констант равновесия. Расчетная система уравнений включает в себя соотношения, полученные путем анализа химических реакций горения компонентов топлива.

В статье [2] для расчета равновесного состава ПС применен метод минимизации термодинамического потенциала. Для заданных значений давления p и температуры T ПС необходимо найти координаты условного минимума энергии Гиббса G :

$$\begin{aligned} \min G(T, p, \mathbf{n}); \\ T = \text{const}; \quad p = \text{const}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N a_{ji} n_i = b_j, \quad j = 1, \dots, m;$$

$$n_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N,$$

где $\mathbf{n}$ — неизвестный вектор состава ПС, компонентами которого являются числа молей веществ n_i ; N и m — количество веществ и химических элементов в системе; a_{ji} — число атомов химического элемента j в веществе i ; b_j — содержание химического элемента j в системе.

Если рабочими координатами являются температура T и объем V , то необходимо найти координаты условного минимума энергии Гельмгольца $F(T, V, \mathbf{n})$. Таким образом, в статье [2] для расчета равновесного состава ПС использованы две системы уравнений.

В конце 1970-х годов в МВТУ им. Н.Э. Баумана были созданы метод и алгоритм расчета равновесного состава ПС [3]. В основу метода положен принцип максимума энтропии S , в соответствии с которым энтропия изолированной системы максимальна в состоянии равновесия. Условие изолированности на практике означает, что скорость релаксации процессов внутри системы значительно превышает скорость изменения условий на ее границах. В этом случае задачу расчета равновесия можно сформулировать следующим образом:

$$\max S(U, V, \mathbf{n}); \quad (2)$$

$$U = \text{const}; \quad V = \text{const};$$

$$\sum_{i=1}^N a_{ji} n_i = b_j, \quad j = 1, \dots, m;$$

$$n_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N,$$

где U — внутренняя энергия.

Формулировки (1) и (2) позволяют получить одну и ту же систему уравнений и неравенств для определения равновесного состава ПС [4]:

$$g_i - \sum_{j=1}^m a_{ji} \lambda_j \geq 0, \quad i = 1, \dots, N; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N a_{ji} n_i = b_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где λ_j — неопределенные множители Лагранжа.

В приближении к модели идеальный газ — нулевой объем конденсированных фаз справедливы следующие соотношения:

- для веществ в конденсированном состоянии

$$g_i = H_i^0(T) - TS_i^0(T);$$

- для веществ в газообразном состоянии

$$g_i = H_i^0(T) - TS_i^0(T) + RT \ln(p_i/p^0),$$

где $H_i^0(T)$ и $S_i^0(T)$ — энтальпия и энтропия вещества i в стандартном состоянии при температуре T ; p_i — парциальное давление вещества i ; p^0 — стандартное давление; R — газовая постоянная.

В работе [3] при создании алгоритма система уравнений (3), (4) была дополнена уравнением состояния идеального газа, которое явным образом задает взаимосвязь между температурой, давлением и объемом ПС. Такой подход дает возможность рассчитать равновесный состав ПС при заданных значениях двух из трех параметров (температуры, давления и объема ПС) с использованием одной системы уравнений, а не двух, как в работах [1, 2].

Если задана энтальпия, а температура неизвестна, то расчетную систему уравнений надо дополнить соотношением

$$H = \sum_{i=1}^N H_i^0(T) n_i. \quad (5)$$

Если неизвестна температура, но задана энтропия, то используют дополнительное соотношение

$$S = \sum_{i=1}^N S_i^0(T) n_i - R \sum_{i \in I_g} n_i \ln p_i, \quad (6)$$

где I_g — множество индексов газообразных веществ.

Параметры критического сечения сопла определяют из условия равенства скоростей потока и местной скорости звука. Решение находят итерационно путем многократного определения равновесного состава ПС при заданных значениях энтропии и давления. Предполагают, что значение энтропии S_{2*} вычислено при расчете параметров в камере сгорания, а давление варьируют следующим образом [2].

Начальное приближение для расчета критического давления $p_{кр}$ определяют из соотношения

$$p_{кр} = p_{2*} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где k — показатель процесса расширения; p_{2*} — давление ПС в камере сгорания.

Итерационное уточнение критического давления выполняют по следующим выражениям:

$$p_{кр i+1} = \left(p \frac{1+kM^2}{1+k} \right)_{кр i};$$

$$W_{кр i} = \sqrt{2[H_T - H(S_{2*}, p_{кр i})]};$$

$$M = \left(\frac{W}{a} \right)_{кр i};$$

$$a_{кр}^2 = V^2 \frac{C'_p (\partial p / \partial T)_V}{C'_V (\partial V / \partial T)_p},$$

где $W_{кр i}$ — итерационное значение скорости течения потока; H_T — энтальпия топлива; $H(S_{2*}, p_{кр i})$ — итерационное значение энтальпии; $a_{кр i}$ — итерационное значение равновесной скорости звука; C'_p и C'_V — равновесные теплоемкости ПС при постоянных давлении и объеме ПС.

Решение считают найденным, когда абсолютное значение разности скорости потока и местной скорости звука меньше 0,01 м/с.

Программные комплексы для теплового расчета. Алгоритм работы [1] был задействован при подготовке многотомного справочника по термодинамическим и теплофизическим свойствам ПС ракетных топлив. Справочник использовался в то время, когда компьютеров в СССР было немного. При подготовке справочника была проделана огромная работа, кроме программы расчета создана БД по термодинамическим свойствам веществ, разработана методика расчета свойств переноса газообразных ПС, оценено влияние сил межмолекулярного взаимодействия на результаты вычислений и т. д. Однако соответствующий программный комплекс распространения не получил.

Созданный в NASA алгоритм работы [2] был применен для разработки программного комплекса СЕА, предназначенного для расчета равновесного состава и свойств ПС ракетных топлив. С его помощью также можно вычислить параметры детонационных и ударных волн. Транспортные свойства (коэффициенты

вязкости и теплопроводности) некоторых ПС в программном комплексе CEA определяются с помощью аппроксимирующих соотношений, параметры которых содержатся в БД по транспортным свойствам. Результаты работы хорошо документированы в нескольких отчетах, находящихся в открытом доступе. Текст программы CEA на языке Fortran также можно найти в сети Интернет.

На основании алгоритма работы [2], программы CEA и БД NASA разработан программный комплекс CEARUN с удобным веб-интерфейсом и свободным доступом.

Эти же алгоритм и БД использованы для разработки программного комплекса RPA, распространяемого на коммерческой основе. Однако имеется бесплатная версия с усеченными возможностями. Кроме расчета равновесного состава и характеристик ПС, программный комплекс RPA предоставляет возможность расчета охлаждения камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) и определения формы охлаждающего тракта. С его помощью можно оценить размеры камеры сгорания и сопла по заданному значению тяги, массового расхода топлива или диаметра критического сечения сопла, указать коэффициенты потерь, выбрать тип ЖРД, форму сопла и модель течения потока в нем. Есть интересная возможность определения зависимости удельного импульса тяги от высоты полета и массового расхода компонентов топлива. Можно утверждать, что на сегодняшний день RPA является наиболее специализированным программным комплексом, предназначенным для проектирования ЖРД.

Еще один вариант применения алгоритма [2] и базы NASA представлен в виде программного комплекса RocketCEA. В нем создан пользовательский интерфейс на языке Python для консольного приложения, написанного на языке Fortran. Для интеграции приложения и интерфейса разработчики немного модифицировали оригинальный код CEA, созданный в NASA. Интересной особенностью RocketCEA является возможность использования библиотеки исследования параметрической модели Parasol.

Сравнительно недавно начал развиваться проект Combustion Toolbox [5], который также предоставляет возможность теплового расчета ХТРД. Алгоритм работы [2] реализован с применением функций пакета прикладных про-

грамм MATLAB. Предусмотрена возможность подключения различных БД по термодинамическим свойствам веществ. В состав программного комплекса входят несколько специализированных модулей, предназначенных для расчета равновесного состава ПС, параметров детонации и ударных волн, а также характеристик ХТРД.

Кроме того, в сети Интернет можно найти еще несколько программ, которые предоставляют графический интерфейс, облегчающий доступ к программе CEA с возможностью анализа результатов расчета.

Алгоритм работы [3] реализован в виде многоцелевого программного комплекса АСТРА, позволяющего рассчитать равновесный состав и свойства ПС ракетных топлив. Текст программы АСТРА на языке программирования Fortran приведен в работе [3].

Позже на основании этого алгоритма был создан программный комплекс ТЕРРА [6], содержащий расширенную версию БД ИВТАН-ТЕРМО. В состав БД программы ТЕРРА также входят значения параметров потенциала межмолекулярного взаимодействия Леннарда — Джонса, на основе которых вычисляются транспортные свойства ПС. Отличительной особенностью программного комплекса ТЕРРА является возможность включения в модель конденсированных растворов, которые могут образовываться, если в составе ПС есть конденсированные вещества.

На основе алгоритма работы [3] создан алгоритм расчета равновесного состава ПС с использованием модели реального газа, реализованный в виде программного комплекса REAL [4]. В состав этого программного комплекса также входит БД по термодинамическим свойствам веществ и параметрам потенциала Леннарда — Джонса.

Достаточно давно развивается проект Cantera — комплекс программ с открытым исходным кодом для решения задач, связанных с химической кинетикой, равновесной термодинамикой и процессами переноса [7]. Для расчета равновесного состава ПС использован алгоритм Вилларса — Круиза — Смита, описанный в монографии [8]. Возможность применения этого комплекса для расчета характеристик ракетного двигателя рассмотрена в работе [9]. В частности, его использовали при разработке программы для автоматизированного расчета и анализа термодинамических и геометрических

характеристик ЖРД Dedal. Программа позволяет определять параметры сопловой системы и размеры камеры сгорания по условному времени пребывания.

Однако все перечисленные программы являются закрытыми, либо достаточно сложными для модификации и встраивания в другие, более сложные программы, где процедура расчета равновесного состава ПС является лишь одной из функций. Для решения подобных задач, а также для исследовательских целей предназначена программа с открытым исходным кодом Rengine, написанная на языке программирования Julia. Алгоритм расчета описан в работах [10, 11]. Для определения равновесного состава ПС использован метод минимизации термодинамического потенциала. Определение координат условного минимума нелинейной целевой функции проводится с помощью свободно распространяемой библиотеки Ipopt [12].

К сожалению, передать информацию о термодинамических свойствах веществ непосредственно в процедуру оптимизации библиотеки Ipopt затруднительно, поэтому если температура не задана, ее необходимо найти, решая соответствующее нелинейное уравнение. Если задана энтальпия H , то итерационное значение температуры, удовлетворяющее условию (5), определяется выражением

$$T_{i+1} \approx T_i + \frac{H - H(T_i)}{C_p(T_i)}, \quad (7)$$

где $H(T_i)$ — итерационное значение энтальпии ПС; $C_p(T_i)$ — равновесная теплоемкость ПС при постоянном давлении, способ расчета которой приведен в работе [11].

Решение считается найденным, если модуль разности $|T_{i+1} - T_i|$ меньше заданного значения.

Если задана энтропия S , то итерационное значение температуры, удовлетворяющее условию (6), вычисляется по формуле

$$T_{i+1} \approx T_i \left[1 + \frac{S - S(T_i)}{C_p(T_i)} \right], \quad (8)$$

где $S(T_i)$ — итерационное значение энтропии ПС.

Аналогичным образом (с помощью соотношений типа (7) и (8)) определяют равновесный состав ПС в камере сгорания, в критическом сечении и на срезе сопла в программных комплексах [1, 7].

Источники информации о термодинамических свойствах веществ. Основными источниками информации о термодинамических свойствах ПС рассмотренных программных комплексов служат два справочника — «Термодинамические свойства индивидуальных веществ» (ТСИВ) и NIST-JANAF. На основе справочника ТСИВ создана БД ИВТАНТЕРМО [13], которая содержит информацию о термодинамических свойствах около 3400 веществ, образованных из 96 химических элементов. Данные NIST-JANAF хранятся в БД [14] термодинамических свойств около 1700 веществ, полученных из 48 химических элементов.

Большинство зарубежных программных комплексов для расчета характеристик ПС ракетных топлив использует компилятивную базу NASA [15], включающую в себя данные о термодинамических свойствах около 2000 веществ, а также о свойствах некоторых компонентов жидких ракетных топлив. Основными источниками данных в ней являются справочники ТСИВ и NIST-JANAF. Еще одним источником информации является БД, приведенная в работе [16].

Выводы

1. Проведенный обзор литературы показал, что существует несколько программных комплексов, предназначенных для теплового расчета характеристик ХТРД. Большинство программ созданы с помощью алгоритма [2], который не является оптимальным, однако описан в открытых источниках наиболее подробно, а текст программы на языке Fortran можно найти в сети Интернет.

2. Перспективным направлением развития методов термодинамического моделирования процессов в камере ракетного двигателя является использование специализированной свободно распространяемой библиотеки Cantera. Основными источниками информации о термодинамических свойствах веществ являются БД ИВТАНТЕРМО, NIST-JANAF и NASA.

3. Возможные пути дальнейшего совершенствования программных комплексов подобного рода предполагают использование более сложных моделей, учитывающих химическую неравновесность процессов горения и реальные свойства газовой фазы, уточнение и пополнение данных о термодинамических свойствах индивидуальных веществ.

Литература

- [1] Глушко В.П., ред. *Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания*. Т. 1. Москва, ВИНТИ, 1971. 263 с.
- [2] Zeleznik F.J., Gordon S. Calculation of complex chemical equilibria. *Ind. Eng. Chem.*, 1968, vol. 60, no. 6, pp. 27–57, doi: <https://doi.org/10.1021/ie50702a006>
- [3] Синярев Г.Б., Слынько Л.Е., Трусов Б.Г. Метод, универсальный алгоритм и программа термодинамического расчета многокомпонентных гетерогенных систем. *Труды МВТУ*, 1978, № 268. 56 с.
- [4] Белов Г.В. *Термодинамическое моделирование*. Москва, Научный Мир, 2002. 184 с.
- [5] Cuadra A., Huete C., Vera M. Combustion toolbox: an open-source thermochemical code for gas-and condensed-phase problems involving chemical equilibrium. *arXiv:2409.15086*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.15086>
- [6] Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 1, с. 240–249, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-1-31>
- [7] Cantera: веб-сайт. URL: <https://cantera.org/> (дата обращения: 11.08.2025).
- [8] Smith W.R., Missen R.W. *Chemical reaction equilibrium analysis*. Wiley, 1982. 364 p.
- [9] Implementing CEA calculations using Cantera. *kyleniemeyer.github.io: веб-сайт*. URL: https://kyleniemeyer.github.io/rocket-propulsion/thermochemistry/cea_cantera.html (дата обращения: 11.06.2025).
- [10] Белов Г.В. Расчет равновесного состава сложных термодинамических систем с использованием языка Julia и библиотеки Ipropt. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2021, № 3, с. 24–45, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-3-24-45>
- [11] Белов Г.В. Развитие средств термодинамического расчета характеристик ракетного двигателя с использованием языка программирования Julia. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 4, с. 80–93, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-80-93>
- [12] Wächter A., Biegler L.T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Math. Program.*, 2006, vol. 106, no. 1, pp. 25–57, doi: <https://doi.org/10.1007/s10107-004-0559-y>
- [13] Belov G.V., Dyachkov S.A., Levashov P.R. et al. The IVTANTHERMO-Online database for thermodynamic properties of individual substances with web interface. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 946, art. 012120, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/946/1/012120>
- [14] NIST-JANAF thermochemical tables. URL: <https://janaf.nist.gov> (дата обращения: 11.06.2025).
- [15] McBride B.J. *Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species*. NASA Langley Research Center, 1993. 90 p.
- [16] Burcat A., Ruscic B. *Third millennium ideal gas and condensed phase thermochemical database for combustion with updates from active thermochemical tables*. Report No. ANL-05/20, Argonne, 2005. 26 p.

References

- [1] Glushko V.P., ed. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya*. T. 1 [Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products. Vol. 1]. Moscow, VINITI Publ., 1971. 263 p. (In Russ.).
- [2] Zeleznik F.J., Gordon S. Calculation of complex chemical equilibria. *Ind. Eng. Chem.*, 1968, vol. 60, no. 6, pp. 27–57, doi: <https://doi.org/10.1021/ie50702a006>
- [3] Sinyarev G.B., Slynko L.E., Trusov B.G. Method, universal algorithm, and program for thermodynamic calculation of multicomponent heterogeneous systems. *Trudy MVTU*, 1978, no. 268. 56 p. (In Russ.).
- [4] Belov G.V. *Termodinamicheskoe modelirovanie* [Thermodynamic modeling]. Moscow, Nauchnyy Mir Publ., 2002. 184 p. (In Russ.).
- [5] Cuadra A., Huete C., Vera M. Combustion toolbox: an open-source thermochemical code for gas-and condensed-phase problems involving chemical equilibrium. *arXiv:2409.15086*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.15086>

- [6] Trusov B.G. Code system for simulation of phase and chemical equilibriums at higher temperatures. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana*, 2012, no. 1, pp. 240–249, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-1-31> (in Russ.).
- [7] *Cantera: website*. URL: <https://cantera.org/> (accessed: 11.08.2025).
- [8] Smith W.R., Missen R.W. *Chemical reaction equilibrium analysis*. Wiley, 1982. 364 p.
- [9] Implementing CEA calculations using Cantera. *kyleniemeyer.github.io: website*. URL: https://kyleniemeyer.github.io/rocket-propulsion/thermochemistry/cea_cantera.html (accessed: 11.06.2025).
- [10] Belov G.V. Calculation of equilibrium composition of complex thermodynamic systems using Julia language and Ipopt library. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2021, no. 3, pp. 24–45, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-3-24-45> (in Russ.).
- [11] Belov G.V. Development of tools for thermodynamic calculation of rocket engine characteristics using the Julia programming language. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2021, no. 4, pp. 80–93, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-4-80-93> (in Russ.).
- [12] Wächter A., Biegler L.T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Math. Program.*, 2006, vol. 106, no. 1, pp. 25–57, doi: <https://doi.org/10.1007/s10107-004-0559-y>
- [13] Belov G.V., Dyachkov S.A., Levashov P.R. et al. The IVTANTHERMO-Online database for thermodynamic properties of individual substances with web interface. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 946, art. 012120, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/946/1/012120>
- [14] *NIST-JANAF thermochemical tables*. URL: <https://janaf.nist.gov> (accessed: 11.06.2025).
- [15] McBride B.J. *Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species*. NASA Langley Research Center, 1993. 90 p.
- [16] Burcat A., Ruscic B. *Third millennium ideal gas and condensed phase thermochemical database for combustion with updates from active thermochemical tables*. Report No. ANL-05/20, Argonne, 2005. 26 p.

Статья поступила в редакцию 03.10.2025

Информация об авторе

БЕЛОВ Глеб Витальевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gbelov@yandex.ru).

Information about the author

BELOV Gleb Vitalievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Spacecraft and Launch Vehicles Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gbelov@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Белов Г.В. Программные комплексы для теплового расчета химико-термических ракетных двигателей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 6, с. 105–111.

Please cite this article in English as:

Belov G.V. Software packages for thermal calculation of chemical rocket engines. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 6, pp. 105–111.