

УДК 658.512: 67.02

Алгоритм автоматизированного проектирования реализуемых последовательностей сборки изделий ракетно-космической техники на основе применения гиперграфов ограничений

А.А. Лушкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Algorithm for automated design of the implementable sequences in assembling the spacecraft system components based on introduction of the constraint hypergraphs

A.A. Lushkin

Bauman Moscow State Technical University

Сборка — завершающий и один из самых важных этапов производственного цикла изготовления изделия. Проектирование технологического процесса сборки — не менее важный этап, который существенно влияет на трудоемкость и себестоимость производства. В то время как множество операций по разработке технологических процессов изготовления изделия автоматизировано, проектирование последовательности сборки до сих пор выполняют вручную. Разработка средств и методов автоматизации проектирования последовательности сборки повысит не только эффективность этого процесса, но и качество получаемого результата, что может существенно снизить себестоимость проектирования и производства изделия. В связи с этим автоматизация проектирования последовательности сборки является современной и актуальной задачей. Предложен алгоритм автоматизированного проектирования набора реализуемых последовательностей сборки, основанный на использовании графов связей и ограничений. Для тестирования алгоритма рассмотрены процессы сборки двух изделий. Описана взаимосвязь между деталями, а также конструктивные сборочные ограничения. Предложена классификация сборочных соединений, позволяющая определять оптимальную последовательность сборки из числа реализуемых.

EDN: KHMIQD, <https://elibrary/khmiqd>

Ключевые слова: гиперграф ограничений, последовательность сборки, параллельный характер сборки, автоматизация проектирования последовательности сборки

Assembly is the final and one of the most important stages in the product manufacture cycle. Design of the assembly technological process appears to be an equally important stage significantly affecting the manufacture labor intensity and cost. While a lot of operations in developing the product manufacture processes are automated, the assembly sequence design is still manual. Design and development of tools and methods in automating the assembly sequence would increase not only the process efficiency, but also the resulting quality, which could significantly reduce the cost of both the product design and production. In this regard, automating the assembly sequence design becomes a demanded and relevant task. The

paper proposes an algorithm for automated design of a set of the implementable assembly sequences based on introducing the interaction and constraint graphs. It considers processes in assembling two products to test the algorithm. Relationship between the components, as well as between the design assembly constraints, are described. Classifiers for the assembly connections are developed making it possible to identify the optimal assembly sequence out of those implemented.

EDN: KHMIQD, <https://elibrary/khmiqd>

Keywords: constraint hypergraph, assembly sequence, parallel assembly, assembly sequence design automation

Актуальность задачи автоматизации проектирования технологических процессов сборки обусловлена следующими причинами. Во-первых, ее решение позволит оптимизировать производство и снизить затраты на проектирование и изготовление изделий. Во-вторых, система автоматизированного проектирования сборочных процессов сможет учитывать различные технологические требования, что повысит качество продукции и снизит количество брака. В-третьих, она обеспечит гибкость и масштабируемость производства, позволяя быстро адаптироваться к изменениям в производственной среде [1, 2].

Цель статьи — разработка алгоритма для автоматизированного проектирования реализуемых последовательностей сборки (ПС) и проверка его адекватности на примере двух сборочных моделей.

В качестве исходных данных для разработки алгоритма автоматизированного проектирования реализуемых ПС использованы граф связей и гиперграф ограничений. Граф связей представляет собой ненаправленный граф, вершинами которого являются детали, а ребрами — связи между этими деталями [3–5]. Он наглядно отображает все взаимосвязи внутри сборки и значительно упрощает формирование гиперграфа ограничений.

Гиперграф ограничений удобнее представлять в виде матрицы или таблицы [6, 7]. Он содержит данные о геометрической разрешимости сборки — конструктивные сборочные ограничения. Каждому ограничению соответствует одна строка таблицы, состоящая из трех столбцов. В первых двух столбцах указывают детали, имеющие между собой хотя бы одну связь. В последний столбец записывают деталь, которую нельзя устанавливать в сборочную единицу, если перед ней будут собраны детали из рассматриваемой пары в первых двух столбцах.

Например, запись ПС 1–4–3 означает, что деталь 3 нельзя добавить в сборку после того,

как собрана пара деталей 1–4. Иными словами, деталь 3 должна быть задействована в сборке до того, как будет установлена деталь 4. Совокупность данных о связях между деталями и конструктивных ограничениях, накладываемых на эти связи, однозначно определяет множество реализуемых ПС.

Преимущество такого подхода заключается в исключении ветвей нереализуемых ПС на ранних этапах ее проектирования, что значительно оптимизирует работу алгоритма и снижает количество вычислений.

В настоящее время пользователь задает вручную графы связей и ограничений на основе анализа каждой сборочной модели, но процесс формирования исходных данных можно частично автоматизировать. Например, граф связей можно извлечь непосредственно из САПР-файла сборки, так как вся информация о взаимосвязях и контактах деталей между собой уже заложена в нем [8–10]. Однако для реализации такого подхода 3D-модель сборки должна быть тщательно подготовлена и содержать необходимый и достаточный набор сопряжений.

Модели для тестирования алгоритма. Для проверки адекватности предложенного алгоритма выбраны две модели.

Первая модель — прототип устройства для обслуживания раскрываемых космических конструкций — рассмотрена в работе [11]. Она состоит из десяти уникальных деталей: корпуса, ответной пластины, поворотной оси, пружины кручения, фиксатора оси, пружины сжатия, запирающего штифта, стопорного элемента, подшипника и его оси. В рамках выбранного подхода использование гиперграфа ограничений означает, что набор конструктивных ограничений необходимо формировать только для уникальных деталей. При этом сборка может содержать несколько экземпляров одной и той же детали, не влияющих на ПС. Для этой модели сформированы шестнадцать ограничений.

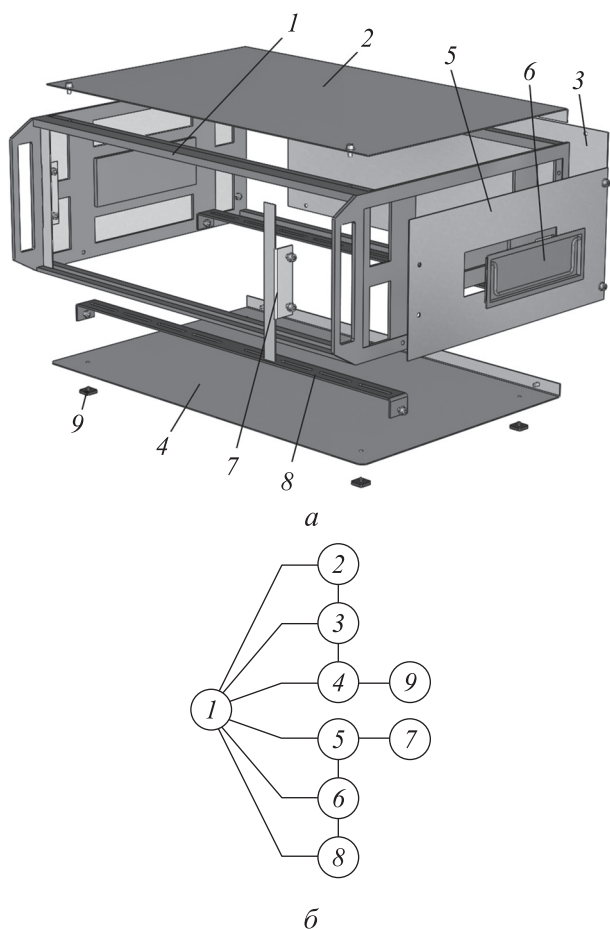


Рис. 1. 3D-модель (а) и граф связей (б) корпуса для РЭА типа К2Б2

Вторая модель — корпус для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) типа К2Б2. Он включает в себя девять уникальных деталей (рис. 1, а): каркас 1, верхнюю 2, заднюю 3, нижнюю 4 и боковую 5 панели, рукоятку 6, переднюю планку 7, монтажный кронштейн 8 и ножку 9. Граф связей корпуса РЭА типа К2Б2 показан на рис. 1, б.

Для этого изделия сформированы шесть конструктивных ограничений (табл. 1). В отличие от первого изделия, у второй модели компоненты связаны резьбовыми соединениями. Метизы, используемые для этих соединений, выполняют вспомогательную функцию, не влияя на порядок сборки деталей, а значит, они не участвуют в составлении ПС.

В целях учета их предлагается разбивать на группы — пакеты резьбовых соединений — и логически связывать эти группы с соответствующими деталями сборки. Появление такой детали в ПС означает, что ее сборку выполняют с помощью присвоенных ей пакетов резьбовых соединений. В рассматриваемом случае такими

Таблица 1
Конструктивные ограничения корпуса для РЭА типа К2Б2

Первый компонент	Второй компонент	Исключаемый компонент
1	2	3
1	4	3
1	6	5
2	3	1
3	4	1
5	7	1

детальями являются верхняя панель 2, боковая панель 5 и передняя планка 7.

Особенностью рассматриваемых моделей является параллельный характер сборки в отличие от аналогов других авторов [12–14]. Это означает, что одна деталь, две или более участвуют в ПС больше одного раза [15]. Таким образом, ПС этих изделий нельзя записать в виде одной непрерывной строки, отражающей порядок сборки компонентов без повторения сборочных позиций, ее надо будет представить в виде нескольких строк — сборочных этапов.

Алгоритм. Предлагаемый алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 2, позволяет формировать реализуемые ПС изделий с учетом отмеченной особенности.

На первом шаге после импорта исходных данных программа создает иллюстрацию графа связей и определяет базовую деталь, имеющую наибольшее количество связей [5].

На втором шаге происходит генерация базы данных (БД) неполных ПС с помощью рекурсивной функции. Алгоритм обходит вершины графа связей, записывая пройденные ПС. Каждая пара деталей в текущем проходе сверяется с графом ограничений. При обнаружении нарушения этот путь завершается. В ходе выполнения этой части алгоритма отправной поочередно являются все вершины графа связей.

Следует отметить, что БД неполных ПС может содержать повторы, так как функция способна неоднократно проходить через одни и те же вершины графа связей в поисках возможного пути. Для оптимизации работы программы и ограничения рекурсивной функции задают параметр ее глубины, равный количеству деталей в сборке.

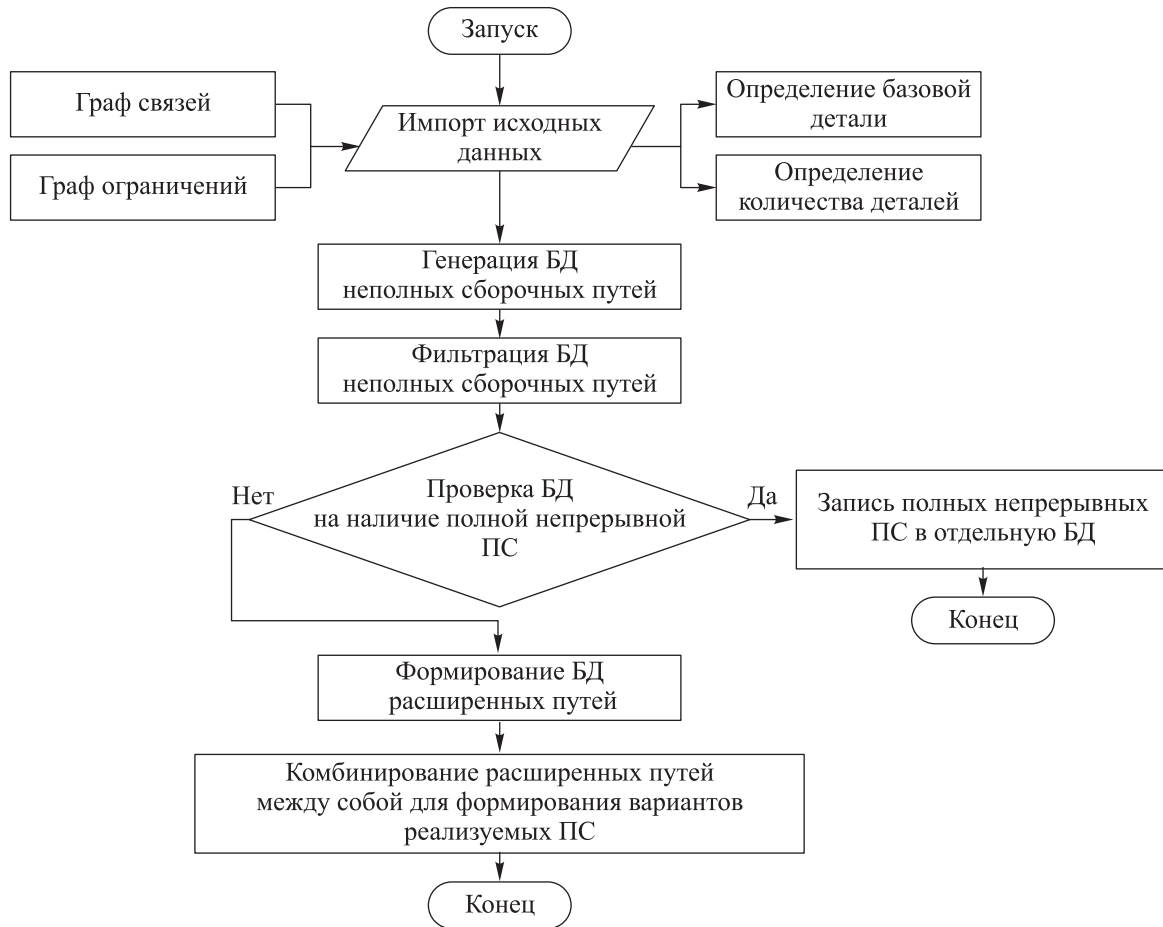


Рис. 2. Блок-схема алгоритма

На третьем шаге происходит фильтрация БД неполных путей с выбором самых коротких из числа равнозначных. Все дублирующие пути удаляются, и в БД остаются только реализуемые ПС. С точки зрения оптимизации машинного времени более эффективно сгенерировать и отфильтровать БД, чем проводить подобную фильтрацию на каждом шаге заполнения этой БД.

На четвертом шаге происходит проверка отфильтрованной БД на наличие путей, по которым непрерывно можно пройти весь граф связей. Иными словами, осуществляется поиск ПС, содержащей в себе все детали. Если такие ПС обнаружены, то они переносятся в отдельную БД, и работа программы по обнаружению реализуемых ПС завершается. Такой сценарий предусмотрен для изделий с последовательной сборкой. В случае отсутствия таких ПС алгоритм переходит к следующему шагу.

На пятом шаге — происходит формирование БД расширенных путей. Неполные ПС из отфильтрованного списка комбинируются

между собой так, чтобы внутри новообразованных ПС не нарушались никакие ограничения и сохранялись связи между деталями. После окончания этого шага в БД находятся ПС, отражающие под сборки — параллельные сборочные операции.

На шестом шаге эти ПС комбинируются между собой так, чтобы в собранных подгруппах присутствовал полный набор деталей.

Таким образом, получают полный набор реализуемых ПС изделия независимо от характера его сборки.

Результаты. Для первой модели получены два варианта реализуемой ПС (табл. 2), для второй — десять (табл. 3).

Таблица 2

Варианты ПС первой модели

Вариант	Последовательность сборки
1	(6-7-1-8), (2-4-1-3-5), (10-9-1)
2	(10-9-1), (6-7-1-8), (2-4-1-3-5)

Таблица 3

Варианты ПС второй модели

Вариант	Последовательность сборки
1	(8-1-5-7-6), (1-3-2-4-4)
2	(8-1-3-2-4-4), (1-5-7-6)
3	(8-1-3-2), (1-5-7-6-4-4)
4	(8-1-3-2), (1-5-7), (1-4-6-4)
5	(8-1-5-7), (1-3-2-4-4-6)
6	(8-1-3-4-4), (1-2-5-7-6)
7	(8-1-3-4-4), (1-5-7), (2-1-6)
8	(1-3-4-4), (8-1-5-7-6-2)
9	(1-3-4-4), (1-5-7-6), (8-1-2)
10	(1-3-4-4), (1-5-7), (8-1-2-6)

Несмотря на то, что у второй модели количество деталей меньше, чем у первой, возможных вариантов ПС у нее значительно больше, что обусловлено меньшим количеством кон-

структивных сборочных ограничений. Следовательно, можно сделать вывод, что на количество реализуемых ПС влияет не число деталей, а количество сборочных ограничений.

Определение наиболее рациональной ПС из числа реализуемых осуществляется путем учета различных технологических критериев сборки, таких как трудоемкость и продолжительность сборочной операции, маршрут перемещения собираемых деталей по производственной площадке, себестоимость сборочной операции и т. д.

Предлагается использовать комплексный критерий оценки (ККО), в котором для учета перечисленных и других критериев задействованы заданные весовые коэффициенты. Для определения ККО предложена классификация сборочных соединений, позволяющая найти весовой коэффициент каждого шага сборки, т. е. соединения каждой пары деталей. ПС с наибольшим значением ККО будет являться приоритетной.

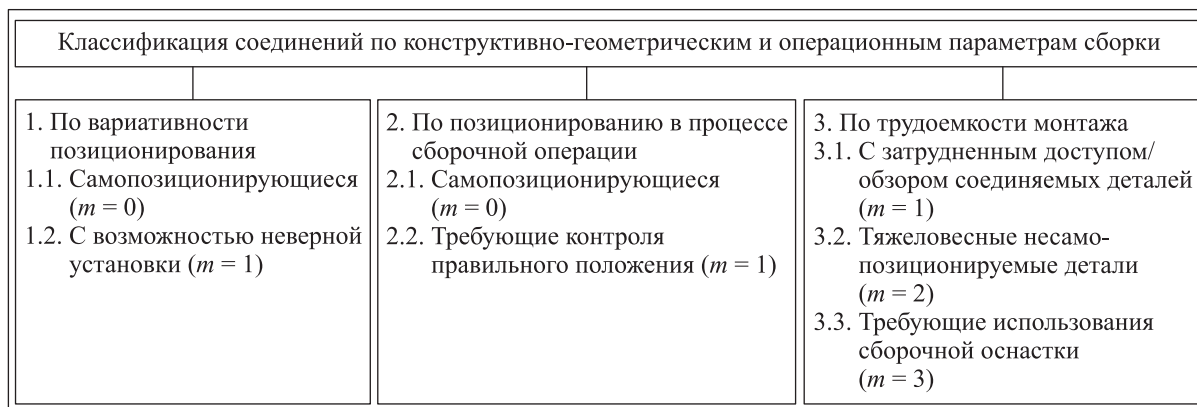


Рис. 3. Классификация соединений по конструктивно-геометрическим и операционным параметрам сборки

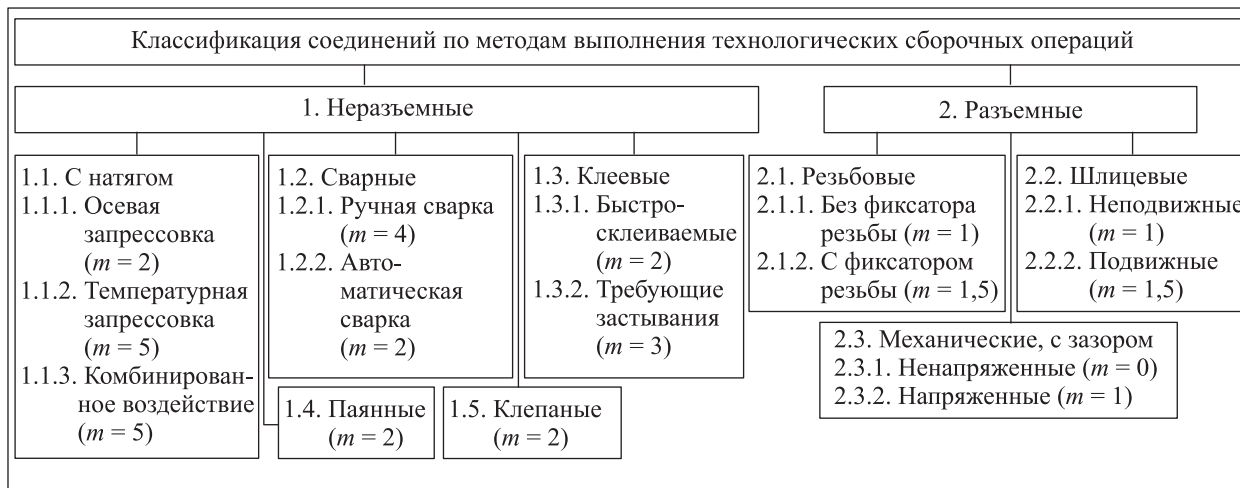


Рис. 4. Классификация соединений по методам выполнения технологических сборочных операций

Классификация по конструктивно-геометрическим и операционным параметрам сборки приведена на рис. 3, а по методам выполнения технологических сборочных операций — на рис. 4. В скобках под каждым вариантом классификации указана его весовая характеристика m . Чем более трудоемкий вид соединения, тем выше весовая характеристика. Например, у неразъемных сварных соединений, выполняемых ручной сваркой, весовая характеристика $m = 4$.

Выводы

1. Предложен алгоритм для автоматизации проектирования реализуемых ПС изделий, позволяющий обрабатывать модели как с последовательной сборкой, так и с параллельной.

2. Приведены результаты моделирования двух сборочных моделей ракетно-космических изделий, выполненного с помощью предложенного алгоритма, которые подтвердили его работоспособность.

3. Описан метод определения оптимальной ПС, основанный на использовании комплексного критерия оценки. Для формирования этого критерия разработана классификация сборочных соединений с присвоенными весовыми характеристиками.

4. В дальнейшем созданный алгоритм планируется внедрить в разрабатываемое программное обеспечение, а также усовершенствовать и протестировать его работу на большем количестве изделий.

Литература

- [1] Догадкин В.А., Кольга В.В., Трухин В.Р. Параметрический анализ прочности сопла ракетного двигателя на твердом топливе. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2023, т. 24, № 3, с. 510–520.
- [2] Ягодников Д.А., Ирьянов Н.Я. *Ракетные двигательные установки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 84 с.
- [3] Шишков А.Ю., Дунаева И.В., Стерленгова Ж.И. и др. Анализ функционирования РДТТ при наличии застойной зоны. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2014, № 12–1, с. 137–142.
- [4] Милехин Ю.М., Попов В.С., Бурский Г.В. и др. Расчет внутрибаллистических характеристик с учетом теплофизических параметров уноса и газификации теплозащиты РДТТ на стационарном режиме работы и участке глубокого спада давления. Часть 1. Физико-математическая формулировка задачи. *Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах*. Сб. тр. 10 Всерос. конф. Ижевск, УдмФИЦ, 2020, с. 207–217.
- [5] Мормуль Р.В., Еременко П.П., Шайдуров А.А. Математическое моделирование и эксперимент по определению параметров напряженно-деформированного состояния эластичных опорных элементов при нестационарном теплосиловом нагружении. *Химическая физика и мезоскопия*, 2019, т. 21, № 4, с. 502–513, doi: <https://doi.org/10.15350/17270529.2019.4.53>
- [6] Тихомирова Е.А., Будиновский С.А., Живушкин А.А. и др. Особенности развития термической усталости в деталях из жаропрочных сплавов с покрытием. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 3, с. 20–25, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-3-20-25>
- [7] Сабирзянов А.Н., Хаматнурова Ч.Б., Кузьмин В.В. Газодинамические потери в проточной части канального заряда ракетного двигателя твердого топлива. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2022, т. 21, № 3, с. 47–57, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2022-21-3-47-57>
- [8] Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. *Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива*. Москва, Машиностроение, 1988. 240 с.
- [9] Гаврюшин С.С., Красновский Е.Е., Короткая О.В. и др. Использование метода подконструкций для термочувствительного расчета камеры жидкостного ракетного двигателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 4, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-705>
- [10] Печников В.П. Напряженно-деформированное состояние заряда РДТТ, скрепленного с ортотропным корпусом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 7, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-7-855>

- [11] Мейз Дж. *Теория и задачи механики сплошных сред*. Москва, Изд-во ЛКИ, 2007. 320 с.
- [12] Мормуль Р.В., Мерзляков С.Н. Исследование температурного состояния газогенератора твердого топлива при стендовом испытании методом тепловизионной съемки. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2020, № 60, с. 26–33, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2020.60.03>
- [13] Казанцев В.Г., Жаринов Ю.Б., Карпутин М.П. *Динамика и прочность ракетных двигателей на твердом топливе*. Бийск, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2014. 380 с.
- [14] Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Исследование теплообмена в камере сгорания РДТТ в рамках модели гомогенного газа. *Химическая физика и мезоскопия*, 2021, т. 23, № 4, с. 412–419, doi: <https://doi.org/10.15350/17270529.2021.4.37>
- [15] Ершова А.А., Ознобишин А.Б. Исследование напряженно-деформированного состояния системы «корпус-ТЗП-заряд». *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2013, № 35, с. 21–30.

References

- [1] Dogadkin V.A., Kolga V.V., Trukhin V.R. Parametrical analysis of the strength of the nozzle of a solid fuel rocketer. *Sibirskiy aerokosmicheskii zhurnal* [Siberian Aerospace Journal], 2023, vol. 24, no. 3, pp. 510–520. (In Russ.).
- [2] Yagodnikov D.A., Iryanov N.Ya. *Raketnye dvigatelnye ustanovki* [Rocket propulsion systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 84 p. (In Russ.).
- [3] Shishkov A.Yu., Dunaeva I.V., Sterlengova Zh.I. et al. Analysis of functioning of the rocket engine in the presence stagnant zone. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2014, no. 12–1, pp. 137–142. (In Russ.).
- [4] Milekhin Yu.M., Popov V.S., Burskiy G.V. et al. [Calculation of intraballistic characteristics taking into account thermophysical parameters of entrainment and gasification of the RDTT heat shield at steady-state operation and deep pressure drop section. Part 1. Physical and mathematical formulation of the problem]. *Vnutrikamernye protsessy i gorenie v ustanovkakh na tverdom toplive i stvolnykh sistemakh. Sb. tr. 10 Vseros. konf.* [Intrachamber Processes and Combustion in Solid Fuel Plants and Barrel Systems. Proc. 10th Russ. Conf.]. Izhevsk, UdmFITs Publ., 2020, pp. 207–217. (In Russ.).
- [5] Mormul R.V., Eremenko P.P., Shaydurov A.A. Mathematical simulations and experiments on the characterization of stress-strain state of elastic support elements under non-stationary thermal mechanical loading. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2019, vol. 21, no. 4, pp. 502–513, doi: <https://doi.org/10.15350/17270529.2019.4.53> (in Russ.).
- [6] Tikhomirova E.A., Budinovskiy S.A., Zhivushkin A.A. et al. Features of thermal fatigue development in details, produced from heat-resistant alloys with coatings. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. 3, pp. 20–25, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-3-20-25> (in Russ.).
- [7] Sabirzyanov A.N., Khamaturova Ch.B., Kuzmin V.V. Gas-dynamic losses in the flow part of the channel charge of a solid-propellant rocket engine. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2022, vol. 21, no. 3, pp. 47–57, doi: <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2022-21-3-47-57> (in Russ.).
- [8] Shishkov A.A., Panin S.D., Rumyantsev B.V. *Rabochie protsessy v raketnykh dvigatelyakh tverdogo topliva* [Working processes in solid propellant rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 240 p. (In Russ.).
- [9] Gavryushin S.S., Krasnovskiy E.E., Korotkaya O.V. et al. Application of the substructure method for thermal stress-strain assessment of a liquid-propellant rocket engine combustion chamber. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 4, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-705> (in Russ.).
- [10] Pechnikov V.P. Stress and strain state of the solid-propellant rocket engine charge fastened to the orthotropic body. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 7, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-7-855> (in Russ.).

- [11] Mase G.E. *Theory and problems of continuum mechanics*. McGraw-Hill, 1970. 218 p. (Russ. ed.: *Teoriya i zadachi mekhaniki sploshnykh sred*. Moscow, Izd-vo LKI, 2007. 320 p.)
- [12] Mormul R.V., Merzlyakov S.N. Research of the temperature condition of the gas generator of solid propellant at the stand test by the method of thermal imaging. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2020, no. 60, pp. 26–33, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2020.60.03> (in Russ.).
- [13] Kazantsev V.G., Zharinov Yu.B., Karputin M.P. *Dinamika i prochnost raketnykh dvigateley na tverdom toplive* [Dynamics and Strength of Solid Fuel Rocket Engines]. Biysk, AltGTU im. I.I. Polzunova Publ., 2014. 380 p. (In Russ.).
- [14] Benderskiy B.Ya., Chernova A.A. Investigation of heat transfer in the combustion chamber of a solid-propellant rocket motor within the framework of the homogeneous gas model. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2021, vol. 23, no. 4, pp. 412–419, doi: <https://doi.org/10.15350/17270529.2021.4.37> (in Russ.).
- [15] Ershova A.A., Oznobishin A.B. Analysis of stress-strain state of “case – insulation – grain” system. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2013, no. 35, pp. 21–30. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.04.2024

Информация об авторе

ЛУШКИН Андрей Андреевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: lushkin.andrew@yandex.ru).

Information about the author

LUSHKIN Andrey Andreevich — Postgraduate, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: lushkin.andrew@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лушкин А.А. Алгоритм автоматизированного проектирования реализуемых последовательностей сборки изделий ракетно-космической техники на основе применения гиперграфов ограничений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 11, с. 45–52.

Please cite this article in English as:

Lushkin A.A. Algorithm for automated design of the implementable sequences in assembling the spacecraft system components based on introduction of the constraint hypergraphs. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 11, pp. 45–52.