

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СОПЕЛ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

*С.Д. Ваулин, А.Л. Карташев, М.А. Карташева*

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF DESIGNING OPTIMAL ANNULAR NOZZLES OF HIGH-PERFORMANCE ROCKET PROPULSION IN STRUCTURE OF LAUNCHER

*S.D. Vaulin, A.L. Kartashev, M.A. Kartasheva*

Рассмотрена технология проектирования оптимальных кольцевых сопел высокоэффективных ракетных двигателей. С использованием системного подхода проведена декомпозиция системы «ракета-носитель – ракетный двигатель – сопло ракетного двигателя». Исследованы подсистемы в рассматриваемой системе, особое внимание уделено подсистеме «сопло ракетного двигателя». Изложенные принципы использованы при разработке технологии проектирования оптимальных по энерготяговым характеристикам кольцевых сопел с учетом особенностей течения, характерных для кольцевых сопел. Предложена система математического моделирования, реализующая технологию проектирования кольцевых сопел высокоэффективных ракетных двигателей в составе ракеты-носителя.

*Ключевые слова: кольцевое сопло, технология проектирования, системный подход, высокоэффективный ракетный двигатель, система математического моделирования.*

The technology of designing optimal annular nozzles of high-performance rocket propulsion is considered. Decomposition of system “launcher – rocket propulsion – nozzle of rocket propulsion” is realized of systems approach. Subsystems in considered system are studied, the special attention given for subsystem “nozzle of rocket propulsion”. Stated principles are applied for development technology of designing optimal by energy-propulsion characteristics annular nozzles taking into account feature of flow, typical for annular nozzles. The system of mathematical modeling, realized the technology of designing annular nozzles of high-performance rocket propulsion in structure of launcher is introduce.

*Keywords: an annular nozzle, technology of designing, systems approach, high-performance rocket propulsion, system of mathematical modeling.*

Среди всех элементов, составляющих ракету-носитель, одним из важнейших является ракетный двигатель. В свою очередь, современный ракетный двигатель, являясь одним из элементов ракеты, представляет собой сложную техническую систему, в которой протекает множество различных, взаимосвязанных физических процессов. Параметры этих физических процессов определяются конструкцией ракетного двигателя и способами организации рабочего процесса в ракетном двигателе.

Сопло ракетного двигателя является элементом двигателя, определяющим его тяговые характеристики, т. е. элементом, определяющим эффективность ракетного двигателя в целом. Традиционный подход к проектированию ракеты-носителя, ракетного двигателя и соплового блока заключается в раздельном рассмотрении каждого из элементов системы при наличии известных (заданных) требований и ограничений на характеристики каждого элемента ракеты-носителя. После этого в режиме согласования получаемых характеристик проводится доработка проекти-

## Расчет и конструирование

руемой конструкции с целью обеспечения заданных тактико-технических характеристик ракеты. Рассмотренный процесс может повторяться несколько раз.

Очевидно, что описанный выше процесс не является достаточно эффективным с точки зрения поиска оптимальной (с наибольшей эффективностью отвечающей заданным требованиям) конструкции ракеты-носителя. Поэтому одной из важнейших задач является разработка алгоритмов поиска оптимальной конструкции ракеты и ее отдельных узлов и агрегатов с использованием новых научных подходов и современной вычислительной техники.

Представляется целесообразным использовать при проектировании ракеты принципы системного подхода [1], которые могут быть применены как к ракете в целом, так и к ее отдельным элементам, представляющим сложную систему (например, ракетный двигатель) и являющимся элементами, входящими в систему более высокого уровня.

В данной статье рассматривается применение принципов системного подхода к проектированию кольцевого сопла высокоэффективных ракетных двигателей в составе межконтинентальной баллистической ракеты как элемента, входящего в систему более высокого уровня. Результатом применения системного подхода является разработка принципов комплексной оптимизации сопел ракетных двигателей, в том числе кольцевых сопел, а также создание технологии проектирования оптимальных по тяговым характеристикам кольцевых сопел на основе разработки методологии компьютерного моделирования их газодинамических и тяговых характеристик.

Рассмотрим межконтинентальную баллистическую ракету как сложную техническую систему, состоящую из нескольких систем, каждая из которых также является системой, состоящей из нескольких подсистем. В соответствии с таким подходом сопло ракетного двигателя является элементом иерархической структуры второго уровня, ракетный двигатель – элементом иерархической структуры первого уровня, а сама ракета-носитель – главенствующим элементом иерархической структуры (рис. 1). Сложность современной ракетной техники, да и летательной техники в целом, приводит к существенному влиянию элементов низших иерархических уровней на главенствующий элемент структуры. Так, при разработке носителя «интегральной» компоновки конструкции соплового блока, ракетного двигателя и корпуса носителя должны проектироваться одновременно.

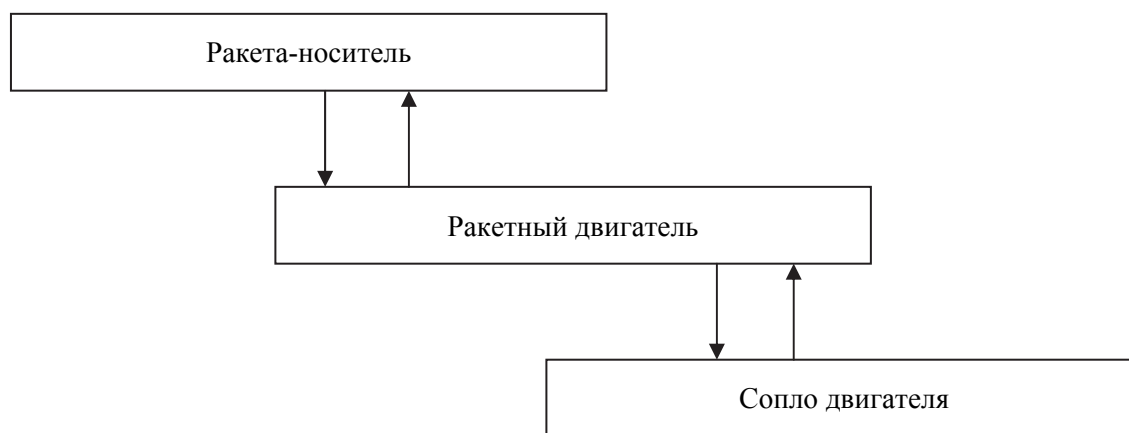


Рис. 1. Иерархическая структура систем

Основной принцип системного подхода – принцип конечной цели – при разработке сопла ракетного двигателя сводится к построению оптимального сопла, обеспечивающего максимальное значение тяговых характеристик в заданных условиях (для ракеты в целом этот критерий может соответствовать максимальному значению дальности полета при фиксированной полезной нагрузке либо максимальному весу полезной нагрузки при фиксированной дальности полета, а также какому-либо другому критериальному параметру). Для анализа системы необходимо провести ее декомпозицию и перейти к модульному построению системы. Такое построение может осуществляться по конструкционным и функциональным признакам. Конструкционная декомпозиция ракеты-носителя более наглядна с точки зрения традиционных подходов к проектированию сложных технических систем, однако, на наш взгляд, имеет один существенный недос-

таток: при таком подходе часто не учитываются особенности протекающих в элементах конструкции физических процессов. Поэтому более приемлемой является модульно-функциональная декомпозиция системы, наиболее полно отражающая деление системы в соответствии с физикой протекающих процессов и определяющая функциональное взаимодействие элементов системы (рис. 2).

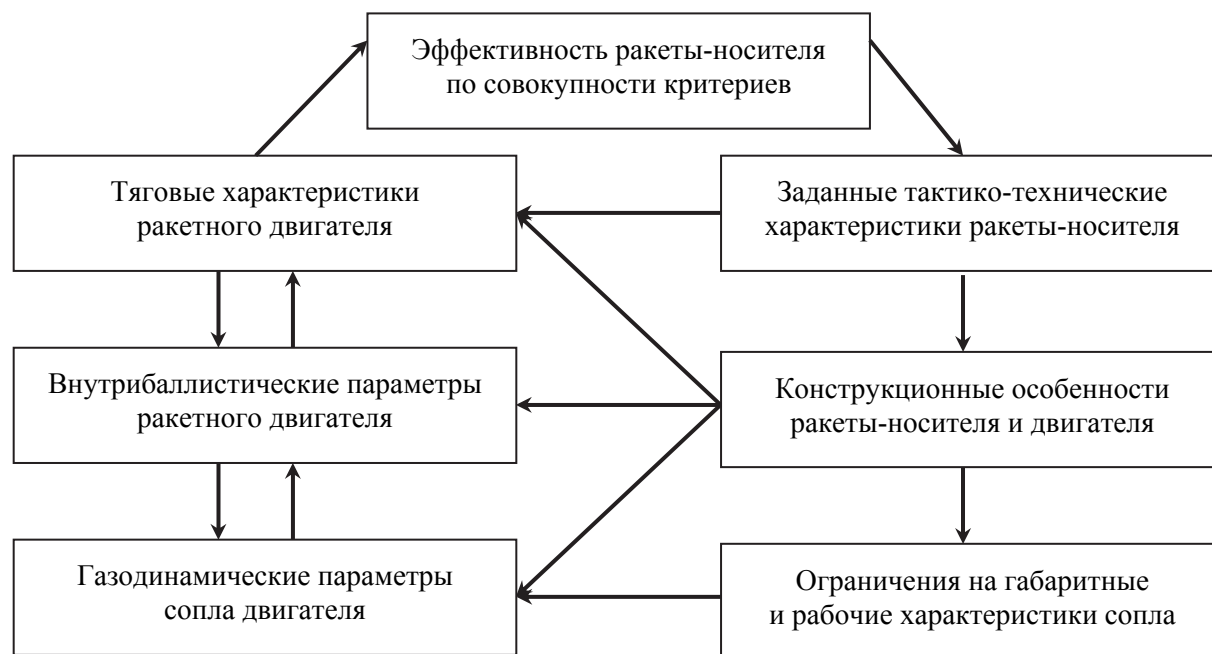


Рис. 2. Модульно-функциональная структура системы

В соответствии с укрупненной модульно-функциональной структурой проводится оптимизация разрабатываемого элемента конструкции, входящего в состав системы высокого иерархического уровня. Основным критерием оптимизации является достижение наибольшей эффективности ракеты в целом. При этом в соответствии с системным подходом критерии оптимизации любого проектируемого элемента ракеты разрабатываются на основе критериев оптимизации технической системы, в составе которой функционирует этот элемент, как предложено в работе [2]. Такой подход позволяет осуществлять оптимизацию в условиях многоуровневой декомпозиции системы, которая неизбежна при проектировании систем такой сложности, какой является современная межконтинентальная баллистическая ракета. В этом случае критерии оптимизации отдельных элементов выбираются таким образом, чтобы повышение эффективности отдельных подсистем вело к повышению эффективности системы в целом. Поэтому критерии оптимизации могут быть выбраны различным образом: для ракеты в целом – общий критерий, для отдельной подсистемы – частный критерий. При проектировании ракетного двигателя и его соплового блока целесообразно применять комплекс (комбинацию) частных критериев, который в ряде случаев может быть сведен к одному критерию оптимизации, т. е. получить оптимальное в смысле Парето решение.

Построение модульно-функциональной структуры ракетного двигателя с целью определения его максимальных тяговых характеристик представляет собой достаточно сложную задачу, трудность решения которой заключается в определении сущности физических процессов, протекающих в элементах двигателя, числа факторов, влияющих на данный физический процесс, и структуры взаимосвязей между рассматриваемыми процессами.

Основная идея предложенного подхода заключается в адекватном компьютерном моделировании физических процессов, протекающих в ракетном двигателе, установлении функциональной взаимосвязи между двумя или несколькими процессами и разработке соответствующего программного обеспечения, построенного по модульному принципу. Данный подход реализован, в частности, для расчета характеристик ракетного двигателя в целом и представляет собой про-

## Расчет и конструирование

---

граммный макромодуль, состоящий, в свою очередь, из отдельных пакетов прикладных программ для расчета рассматриваемых физических процессов [3]. Примером отдельного пакета может служить пакет расчета энерготяговых параметров ракетного двигателя [4]. Данная система предназначена для решения «прямой» оптимизационной задачи определения характеристик ракетного двигателя по заданным конструкционным и рабочим характеристикам.

Однако задачу построения оптимальной подсистемы в системе следует рассматривать в качестве «обратной» задачи, позволяющей найти оптимальные характеристики сопла как результат решения задачи с требуемыми характеристиками двигателя. Классические определения «прямой» и «обратной» задач при рассматриваемом подходе сближаются, так как применяемое структурирование системы требует решения прямых задач, но их решение проводится при заданных характеристиках ракетного двигателя при наличии существенных ограничений на конструкционные (чаще габаритные) и рабочие параметры двигателя. В этих условиях наиболее приемлемым становится использование прямых методов оптимизации, показавших свою эффективность при решении вариационных задач газовой динамики, являющихся сложнейшими оптимизационными задачами [5, 6].

Изложенные принципы следует использовать при разработке технологии проектирования оптимальных по энерготяговым характеристикам кольцевых сопел с учетом особенностей течения, характерных именно для кольцевых сопел. Методология построения оптимальных кольцевых сопел, таким образом, должна основываться на принципах системного подхода, примененных к кольцевому соплу в составе ракетного двигателя и ракеты-носителя в целом; использовании модульно-функционального структурирования системы; математическом моделировании характеристик кольцевого сопла и проведении комплексной процедуры оптимизации параметров кольцевого сопла.

Ведущая роль в реализации изложенного подхода принадлежит математическому моделированию. Разработка алгоритма расчета и построение пакета прикладных программ осуществляется по модульному принципу, в соответствии с построенной модульно-функциональной структурой моделируемого объекта, что одновременно позволяет обеспечить высокую гибкость разрабатываемого пакета прикладных программ и существенно облегчить его модернизацию.

Основой для разработки пакета прикладных программ для комплексной оптимизации кольцевых сопел может служить пакет прикладных программ «SOKOL» [7], состоящий из пяти функциональных модулей: модуля расчета термодинамических характеристик продуктов сгорания ракетного топлива; модуля профилирования кольцевого сопла; модуля расчета течения в до- и трансзвуковой областях кольцевого сопла; модуля расчета течения в сверхзвуковой области кольцевого сопла; модуля расчета параметров донной области за торцом укороченного центрального тела; а также пакет «SOKOL-1» [8].

Функциональное наполнение пакета и взаимодействие модулей (в порядке, приведенном выше) соответствуют «прямой» задаче теории сопла, проектируемого в составе ракетного двигателя. Реализация комплексной оптимизации требует большего функционального наполнения пакета и более гибкой разветвленной структуры взаимодействия модулей пакета. Структура такого пакета прикладных программ достаточно сильно отличается от обычно используемой, а сам пакет следует скорее называть многофункциональной системой математического моделирования, используемой для комплексной оптимизации кольцевого сопла, проводящейся в ходе совместного (поэтапного) решения «прямой» и «обратной» задач теории сопла.

Модульное построение системы математического моделирования обеспечивает гибкость и многовариантность ее конкретного применения, что позволяет быстро перестраивать систему под решение поставленных задач и создавать многоуровневые расчетные комплексы, используемые на различных этапах исследования характеристик кольцевого сопла: от быстрых инженерных расчетов до исследования сложных ударно-волновых структур в соплах различных геометрических конфигураций. Структура одной из возможных систем математического моделирования представлена на рис. 3. В состав системы входит набор функциональных модулей, описывающих физико-химические процессы в кольцевых соплах, в том числе процессы в многокомпонентных средах, а также модули оптимизации геометрических параметров кольцевого сопла и комплексной оптимизации характеристик кольцевого сопла в составе ракетного двигателя и ракеты-носителя.

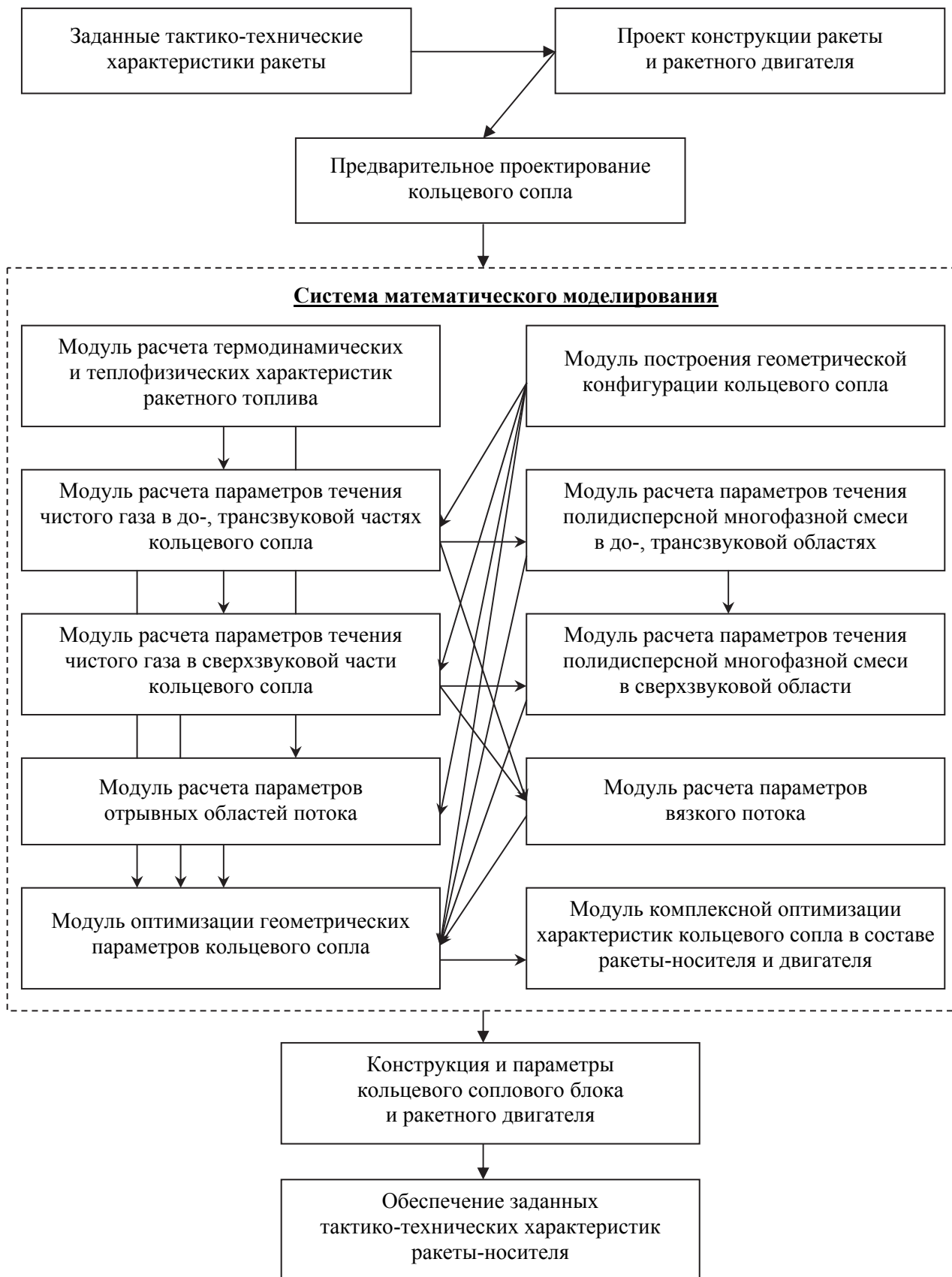


Рис. 3. Система математического моделирования оптимального кольцевого сопла

Необходимым условием функционирования системы математического моделирования является задание исходных условий, требуемых для решения поставленной задачи (количество и вид которых варьируются в зависимости от условий задачи), и наличие баз данных, требуемых для проведения некоторых типов расчета (например, термодинамических). Работа самой системы математического моделирования обеспечивается системной частью и функциональным наполнением пакета прикладных программ, разработанным с применением модульного программирования. Задачей системной части является обеспечение ввода исходных данных, передачи их и результатов расчетов от модуля к модулю в соответствии с заданной расчетной цепочкой и вывод результатов расчетов. Функциональное наполнение пакета включает в себя библиотеку предметно-ориентированных модулей для решения широкого спектра газодинамических, оптимизационных и проектных задач, составляющих основу системы и могущих функционировать как в составе системы, так и автономно, библиотеку баз данных и набор сервисных модулей, обеспечивающих ввод исходных данных и вывод результатов расчетов. Получаемые результаты выводятся в форме, удобной как для анализа работы системы и оценки достоверности получаемых результатов, так и для требуемой конечным пользователем системы (при этом система может взаимодействовать с другими пакетами прикладных программ, например, конструкторскими системами).

Представленная на рис. 3 система математического моделирования позволяет провести численное моделирование характеристик кольцевого сопла с учетом всего спектра физических процессов, протекающих в сопле ракетного двигателя, определить его оптимальные характеристики с учетом параметров не только ракетного двигателя, но и ракеты-носителя в целом. Следует при этом подчеркнуть комплексный характер оптимизации, связанный с многофакторностью и многовариантностью решаемой задачи, рассмотрением всех протекающих физических процессов как единого целого, присущего всему исследуемому объекту.

Применение системного подхода к проектированию такого сложного газодинамического устройства, как кольцевое сопло, и определение характеристик оптимального сопла при помощи вычислительного эксперимента показало свою надежность и эффективность при проведении математического моделирования характеристик кольцевых сопел различных геометрических конфигураций и газодинамических типов в ракетных двигателях различных конструкций. При этом поиск решения «обратной» задачи может быть проведен с различной степенью точности, определяемой количеством учитываемых частных критериев оптимизации в общем критерии оптимальности рассматриваемой системы.

Реализуемый системный подход к построению кольцевого сопла оптимальной конфигурации может быть также реализован с помощью различных математических подходов и методов решения вариационной задачи, однако представляется целесообразным использовать прямой метод оптимизации, позволяющий обеспечить наибольшую эффективность при взаимосвязанном решении «прямой» и «обратной» задач.

### Литература

1. Губанов, В.А. Введение в системный анализ / В.А. Губанов, В.В. Захаров, А.Н. Коваленко. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. – 228 с.
2. Ерохин, Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ / Б.Т. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1991. – 559 с.
3. Макромодуль комплексного расчета параметров энергоустановки. Инструкция по эксплуатации. СОПОТ / А.Л. Карташев, А.Б. Ворожцов, А.А. Глазунов и др. – Миасс; Томск: КБМ: НИИ ПММ, 1989. – 55 с.
4. Пакет прикладных программ расчета энерготяговых параметров: инструкция по эксплуатации. СОПОТ / А.Л. Карташев, А.Б. Ворожцов, А.А. Глазунов и др. – Миасс; Томск: КБМ: НИИ ПММ, 1989. – 27 с.
5. Бутов, В.Г. Применение методов нелинейного программирования для решения вариационных задач газовой динамики / В.Г. Бутов, И.М. Васенин, А.И. Шелуха // Прикладная математика и механика. – 1977. – Т. 41. – Вып. 1. – С. 59–64.
6. Карташев, А.Л. Профилирование оптимального кольцевого сопла с укороченным центральным телом / А.Л. Карташев, М.А. Карташева // Тез. докл. Межотраслевой науч.-практ.

конф. «Снежинск и наука», Снежинск, 29 мая – 2 июня 2000 г. – Снежинск: Изд-во Снежин. физ.-техн. ин-та, 2000. – С. 40–42.

7. Карташев, А.Л. Пакет прикладных программ для проектного расчета профиля и определения газодинамических и тяговых характеристик кольцевого сопла – «SOKOL». НТО 103–42–92 / А.Л. Карташев, Н.А. Обухов, В.С. Шишкин. – Миасс: КБМ, 1992. – 31 с.

8. Карташев, А.Л. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах: моногр. / А.Л. Карташев, М.А. Карташева. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – 158 с.

*Поступила в редакцию 9 февраля 2012 г.*

**Ваулин Сергей Дмитриевич.** Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Двигатели летательных аппаратов», проректор по научной работе, Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – проектирование регулируемых энергетических установок и сложных технических систем, теория теплофизических систем. Тел.: (351) 263-45-97; e-mail: s.d.vaulin@susu.ac.ru

**Sergei D. Vaulin.** The doctor of technical science, professor, the head of “Engines of flying machines” department, vice rector for scientific work, South Ural state university. The area of scientific interests – designing of adjustable power devices and complex engineering systems, theory of heat transfer systems. Tel.: (351) 263-45-97; e-mail: s.d.vaulin@susu.ac.ru

**Карташев Александр Леонидович.** Доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели летательных аппаратов», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – математическое моделирование и проектирование энергетических установок и сложных технических систем, исследование гидрогазодинамических процессов и процессов теплообмена в технических системах. Тел.: (351) 267-92-65; e-mail: al\_kartashev@mail.ru

**Alexander L. Kartashev.** The doctor of technical science, professor of “Engines of flying machines” department, South Ural state university. The area of scientific interests – mathematical simulation and designing of power devices and complex engineering systems, investigation of hydro-, gasdynamics processes and processes of heat transfer in engineering systems. Tel.: (351) 267-92-65; e-mail: al\_kartashev@mail.ru

**Карташева Марина Анатольевна.** Кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты и автоматические установки», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – математическое моделирование и проектирование энергетических установок и сложных технических систем, исследование гидрогазодинамических процессов и процессов теплообмена в технических системах. Тел.: (351) 267-94-61; e-mail: ma\_kartasheva@mail.ru

**Marina A. Kartasheva.** Candidate of technical science, reader of “Flying machines and automatic apparatus” department, South Ural state university. The area of scientific interests – mathematical simulation and designing of power devices and complex engineering systems, investigation of hydro-, gasdynamics processes and processes of heat transfer in engineering systems. Tel.: (351) 267-94-61; e-mail: ma\_kartasheva@mail.ru