

СИСТЕМА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ В УПРАВЛЯЕМЫХ ГАЗОСТРУЙНЫХ СИСТЕМАХ И ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТАХ С КОЛЬЦЕВЫМИ СОПЛАМИ*

А.Л. Карташев, М.А. Карташева

Рассматривается система математического моделирования течений в управляемых газоструйных системах и гидропневмоагрегатах, имеющих в своей конструкции кольцевые сопла различных газодинамических типов и геометрических конфигураций, при течении многокомпонентной среды по тракту кольцевого сопла. Система математического моделирования построена по модульному принципу и содержит инструментальную часть, функциональное наполнение и базы данных. Функциональное наполнение системы представляет библиотеку модулей, предназначенных для решения локальной задачи определения характеристик кольцевого сопла. Входящие в состав системы функциональные модули предназначены для расчета состава и термодинамических характеристик продуктов сгорания, профилирования кольцевого сопла, расчета смешанных и сверхзвуковых течений, расчета параметров турбулентного пограничного слоя и отрывных областей потока. Многофункциональная система математического моделирования позволяет создавать многоуровневые расчетные комплексы, используемые на различных этапах исследования характеристик кольцевых сопел.

Ключевые слова: система математического моделирования, управляемая газоструйная система, гидропневмоагрегат, кольцевое сопло.

Введение

Математическое моделирование течений газа либо многокомпонентных сред в управляемых газоструйных системах и гидропневмоагрегатах, имеющих в своей конструкции кольцевые сопла различных газодинамических типов, при использовании в качестве рабочего тела многокомпонентной среды, представляет собой сложную задачу, требующую разработки специального методологического подхода для ее решения, а также реализующего этот подход прикладного программного обеспечения.

Основные принципы построения пакетов прикладных программ, используемых для проведения математического моделирования течений в кольцевых соплах, представлены в монографии [1], посвященной математическому моделированию течений в кольцевых соплах.

Для математического моделирования течений в кольцевых соплах, являющихся, в том числе, элементами управляемых газоструйных систем и гидропневмоагрегатов, с использованием описанных в монографии [1] вычислительных алгоритмов разработан пакет прикладных программ (ППП) «SOKOL-1», предназначенный для расчета профиля и определения газодинамических и тяговых характеристик кольцевых сопел различных газодинамических типов и геометрических конфигураций. Функциональное наполнение пакета и взаимодействие его модулей соответствуют «прямой» задаче теории сопла, проектируемого в составе рассматриваемых газоструйных системах либо гидропневмоагрегатах.

Построение пакета основано на принципах компьютерного проектирования сложных технических объектов, одним из важнейших принципов данного подхода заключается в адекватном математическом моделировании физических процессов, протекающих в объекте исследований, в данном случае, в кольцевом сопле. При этом функциональная взаимосвязь элементов (модулей) пакета ориентирована на программно-методическое обеспечение проектных исследований кольцевых сопел управляемых газоструйных систем (в том числе ракетных двигателей) и гидропневмоагрегатов. Пакет прикладных программ «SOKOL-1» разработан на основе ППП «SOKOL» [2], который прошел апробирование в ходе численных исследований газодинамических и тяговых характеристик кольцевых сопел, использующих в качестве рабочего тела совершенный газ.

* Работа выполнена за счет субсидий на финансовое обеспечение государственного задания «Научные основы разработки управляемых газоструйных систем».

Система математического моделирования
Макроблок-схема ППП «SOKOL-1» представлена на рис. 1.

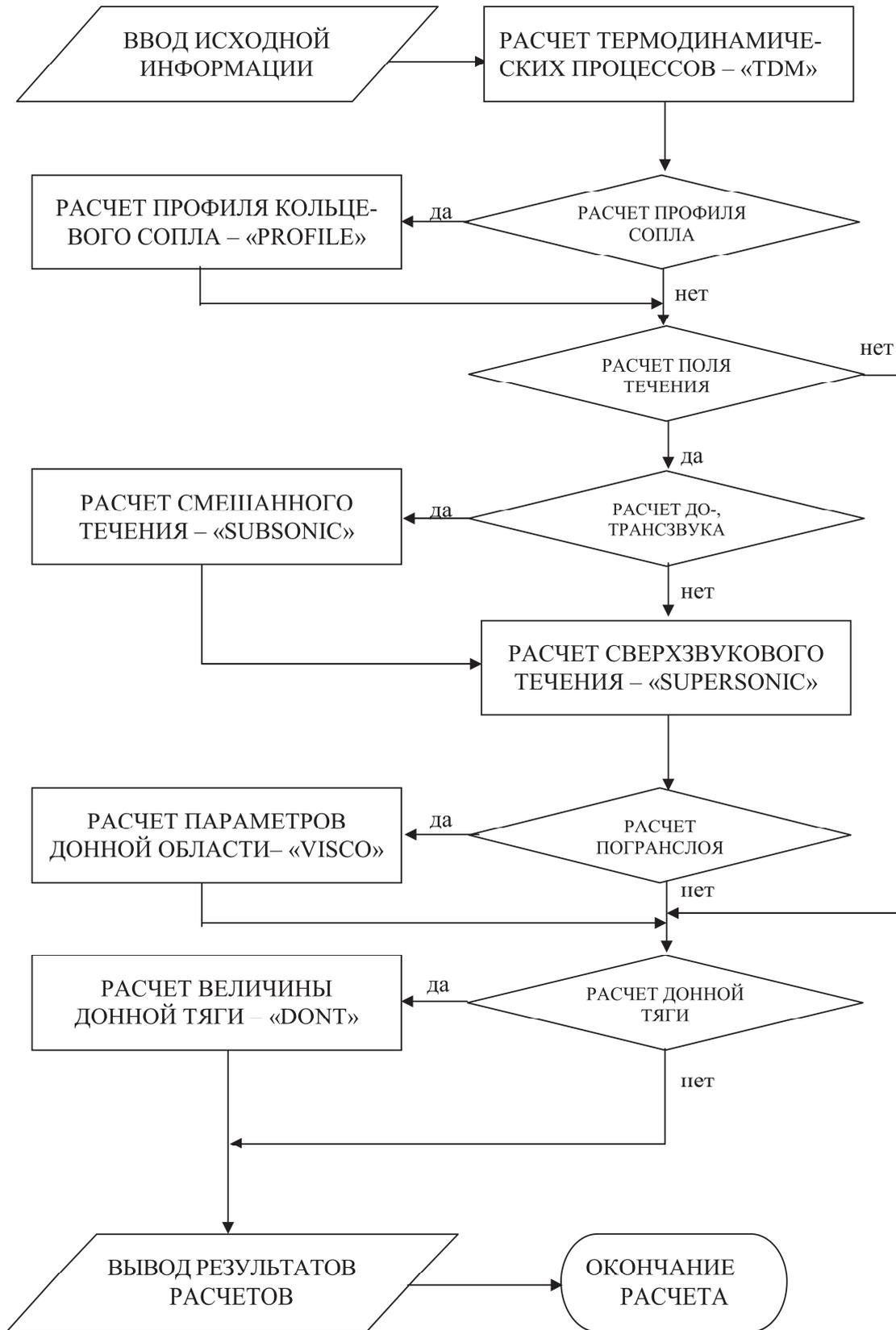


Рис. 1. Макроблок-схема пакета прикладных программ «SOKOL-1»

Пакет прикладных программ «SOKOL-1» построен по модульному принципу и содержит следующие составляющие:

- инструментальную часть;
- функциональное наполнение (библиотека модулей);
- базы данных.

Инструментальная часть пакета представляет собой совокупность системных средств и обеспечивает:

- работу с данными;
- постановку задач в удобном для пользователя виде;
- информационное обеспечение пакета;
- автоматизированное задание исходных данных;
- межмодульный интерфейс.

Функциональное наполнение пакета представляет собой библиотеку модулей, каждый из которых предназначен для решения локальной задачи определения той или иной характеристики сопла либо служит для расчета исходных данных для других модулей пакета. Библиотека модулей ППП «SOKOL-1» состоит из следующих модулей:

- «TDM» – модуль расчета состава и термодинамических характеристик продуктов сгорания ракетного топлива;
- «PROFILE» – модуль расчета (профилирования) геометрической конфигурации кольцевого сопла;
- «SUBSONIC» – модуль расчета смешанных течений в до-, трансзвуковой области кольцевого сопла;
- «SUPERSONIC» – модуль расчета сверхзвуковых течений в кольцевом сопле;
- «VISCO» – модуль расчета параметров турбулентного пограничного слоя на обтекаемых поверхностях кольцевого сопла;
- «DONT» – модуль расчета параметров отрывной области за торцем укороченного центрального тела.

Модуль «TDM» предназначен для расчета термодинамических и теплофизических характеристик продуктов сгорания ракетных топлив. Вычислительный алгоритм модуля методологически основан на положениях, представленных в [3], и использует базы данных индивидуальных веществ и химических соединений, приведенные в [4]. Модуль предназначен для моделирования химических и фазовых равновесий при высоких температурах. Для расчетов используются методы равновесной термодинамики, которые по двум заданным параметрам состояния и исходному химическому составу системы позволяют определить все остальные характеристики равновесия, включая термодинамические параметры, свойства переноса, фазовый и химический состав. Предположение о равновесии (локальном равновесии) системы справедливо при рассматриваемых температурах продуктов сгорания, протекающих по проточному тракту кольцевого сопла. Основы вычислительного алгоритма, реализующего данную методику, представлены в работе [3]. Модуль может осуществлять расчеты как равновесного течения с учетом и без учета процессов кристаллизации жидкой конденсированной фазы, так и «замороженного» течения.

Применение указанного подхода к расчету параметров продуктов сгорания в камере ракетного двигателя и исследованию изменения этих параметров при движении продуктов сгорания по тракту сопла показало высокую надежность и эффективность рассматриваемого подхода для определения параметров рабочей смеси в ракетных двигателях.

Модуль «PROFILE» предназначен для расчета профиля кольцевых сопел различных газодинамических типов методом характеристик и методом прямолинейных характеристик. По заданным геометрическим параметрам (степени расширения, осевому и радиальному габаритным размерам) и рабочим параметрам (расходу рабочего тела, его химическому и фазовому составу) определяются площадь и ширина минимального сечения кольцевого сопла, профили обтекаемых поверхностей соплового блока.

Модуль «SUBSONIC» предназначен для расчета смешанных течений в кольцевых соплах с использованием метода установления и разностной схемы С.К. Годунова – В.П. Колгана [5].

Модуль «SUPERSONIC» предназначен для расчета сверхзвуковых течений в кольцевых соплах с использованием маршевой схемы М.Я. Иванова – А.Н. Крайко – Н.В. Михайлова [6].

Модуль «VISCO» предназначен для расчета параметров турбулентного пограничного слоя на обтекаемых поверхностях кольцевого сопла (прежде всего центрального тела и внешней обечайки). В основу вычислительного алгоритма модуля положен интегральный метод С.С. Кутателадзе – А.И. Леонтьева [7]. Одно из основных назначений этого модуля – расчет параметров пограничного слоя в точке его отрыва на кромке укороченного центрального тела, используемых в качестве исходных данных модулем «DONT». Особенностью модуля «VISCO» является его обязательное взаимодействие с модулями «SUBSONIC» и «SUPERSONIC», рассчитывающими параметры течения идеального газа. Такое взаимодействие осуществляется следующим образом: в до-, трансзвуковой области течения после установления поля течения проводится интегрирование уравнения для толщины потери импульса по схеме Эйлера, затем исходные контуры сопла изменяются на величину, равную толщине вытеснения, во всей области течения строится новая расчетная сетка и поле течения устанавливается в новой расчетной области. Указанная процедура повторяется несколько раз до полного установления потока с пограничным слоем. В сверхзвуковой области течения расчет пограничного слоя производится по маршевой схеме.

Модуль «DONT» предназначен для расчета параметров отрывной области за торцом укороченного центрального тела, определения величин донного давления и донной тяги с помощью метода «разделяющей линии тока» [8].

Базы данных пакета предназначены для хранения исходных данных, динамических переменных, передаваемых от одного расчетного модуля к другому, баз данных характеристик индивидуальных веществ и химических соединений, а также результатов расчета.

Модульный принцип построения пакета позволяет осуществлять расчеты с любым набором функциональных модулей в зависимости от поставленной задачи, в соответствии с которой формируется расчетная цепочка, определяющая взаимодействие модулей друг с другом в процессе решения поставленной задачи. ППП «SOKOL-1» является пакетом открытого типа и поэтому допускает модификацию функционального наполнения. Такая модификация может быть осуществлена включением в библиотеку модулей новых прикладных программ, а также изменением функциональных связей между модулями пакета.

Принципы построения и состав стандартных и динамических переменных пакета, а также особенности функционирования межмодульного интерфейса и наполнения баз данных представлены в [2].

Проведение комплексных численных исследований и оптимизации геометрических характеристик кольцевых сопел 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, получившей название «SOKOL-SYSTEM», представлена на рис. 2 [1].

Система математического моделирования обладает следующими свойствами:

- система ориентирована на проведение проектных исследований кольцевых сопел в составе ракетного двигателя и ракеты-носителя в целом;
- система ориентирована на проведение комплексного математического моделирования характеристик кольцевых сопел различных типов и геометрических конфигураций;
- функциональное наполнение системы организовано по модульному принципу;
- построение расчетной цепочки модулей осуществляется в зависимости от требуемого решения задачи;
- система является открытой и позволяет включать в расчетные цепочки новые модули.



Рис. 2. Система математического моделирования процессов в кольцевых соплах и поиска кольцевого сопла оптимальной конфигурации

Представленная на рис. 2 система математического моделирования является развитием пакета прикладных программ «SOKOL-1» и обладает всеми приведенными выше свойствами. Расчетные функциональные модули, входящие в систему математического моделирования, основаны на

методиках и вычислительных алгоритмах, представленных в гл. 2–4 монографии [1]. Там же приведены результаты, полученные в процессе математического моделирования с помощью разработанных функциональных модулей, а также результаты сравнения полученных результатов с результатами других авторов и тестирования разработанного программного обеспечения по результатам экспериментальных исследований.

Одним из основных свойств системы «SOKOL-SYSTEM» является ее гибкость и многофункциональность. Вариант системы, представленный на рис. 2, может быть изменен введением дополнительных функциональных модулей либо заменой присутствующих модулей новыми.

Для проведения расчетов могут также использоваться фрагменты системы, представляющие наборы (расчетные цепочки) функциональных модулей, предназначенные для решения конкретных задач математического моделирования, примером такого фрагмента является ППП «SOKOL-1» в составе функциональных модулей, использованных для проведения математического моделирования течений чистого газа в кольцевых соплах.

Разработанная система математического моделирования является базовым элементом методологии компьютерного проектирования различных управляемых газоструйных систем (в том числе проектирования кольцевого сопла ракетного двигателя в составе ракеты-носителя, обладающего максимальными тяговыми характеристиками в условиях различных ограничений, накладываемых на геометрические и рабочие параметры сопла).

Система позволяет определить эффективность применения кольцевого сопла в ракетном двигателе маршевой ступени ракеты-носителя, проектируемого в условиях жестких ограничений, накладываемых на ее габаритные характеристики. Такие ограничения характерны для морских баллистических ракет, стартующих с борта подводной лодки, ракет, стартующих с борта самолета-носителя, устройств и агрегатов, предназначенных для функционирования в составе верхних ступеней ракеты, за счет уменьшения габаритов которых можно увеличить зону размещения полезной нагрузки.

Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие результаты.

Разработана система математического моделирования течений в управляемых газоструйных системах и гидропневмоагрегатах с кольцевыми соплами различных типов и конфигураций и оптимизации геометрической конфигурации кольцевого сопла, являющаяся базовым элементом методологии компьютерного проектирования кольцевых сопел.

Система математического моделирования может быть использована для проектирования кольцевого сопла ракетного двигателя в составе ракеты-носителя, обладающего максимальными тяговыми характеристиками в условиях различных ограничений, накладываемых на геометрические и рабочие параметры сопла. Функциональное наполнение системы математического моделирования составляют расчетные модули, в основе которых лежат методы расчета, предложенные в монографии [1].

Литература

1. Карташев, А.Л. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах / А.Л. Карташев, М.А. Карташева. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – 158 с.
2. Карташев, А.Л. Пакет прикладных программ для проектного расчета профиля и определения газодинамических и тяговых характеристик кольцевого сопла – «SOKOL» / А.Л. Карташев, Н.А. Обухов, В.С. Шишкин // Описание применения № 103-42-92. – Миасс: КБМ, 1992. – 31 с.
3. Трусов, Б.Г. «АСТРА» – моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах / Б.Г. Трусов. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1989. – 37 с.
4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник в десяти томах / под ред. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. – Т. 1. – 266 с.
5. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

6. Иванов, М.Я. Метод сквозного счета двумерных и пространственных сверхзвуковых течений / М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Н.В. Михайлов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1972. – Т. 12, № 2. – С. 441–463.

7. Кутателадзе, С.С. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа / С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. – 180 с.

8. Чжен П. Отрывные течения / П. Чжен. – М.: Мир, 1973. – Т. 3. – 333 с.

Карташев Александр Леонидович, д-р. техн. наук, профессор кафедры летательных аппаратов и автоматических установок, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); al_kartashev@mail.ru.

Карташева Марина Анатольевна, канд. техн. наук, доцент кафедры летательных аппаратов и автоматических установок, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); ma_kartasheva@mail.ru.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”
2013, vol. 13, no. 4, pp. 30–37

SYSTEM OF MATHEMATICAL MODELING OF FLOWS IN CONTROLLED GAS-JET SYSTEMS AND HYDROPNEUMATIC DEVICES WITH ANNULAR NOZZLES

A.L. Kartashev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
al_kartashev@mail.ru,

M.A. Kartasheva, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
ma_kartasheva@mail.ru

This article describes a system of mathematical modeling of flows in controlled gas-jet systems and hydropneumatic devices having in its construction annular nozzles of different gas-dynamic types and geometrical configurations when flow of polyphase medium in flowing channel of annular nozzle. System of mathematical modeling is created by modular approach and includes support tools, functional content and databases. Functional content of the system presents a library of modules designed to solve a local problem of determining the characteristics of the annular nozzle. Included in the system function modules are designed to calculate the composition and thermodynamic characteristics of the products of combustion, profiling the annular nozzle, the calculation of mixed and supersonic flows, calculating the parameters of a turbulent boundary layer and flow separation region. Multifunctional system of mathematical modeling allows you to create multi-level computational systems that are used at various stages of the study the characteristics of the annular nozzle.

Keywords: system of mathematical modeling controlled gas-jet systems, hydropneumatic device, annular nozzle, functional module, application package.

References

1. Kartashev A.L., Kartasheva M.A. *Matematicheskoe modelirovanie techeniy v koltsevykh soplakh* [Mathematical Simulation of Flows in Annular Nozzles]. Chelyabinsk, Publ. Center of the South Ural State University, 2011. 158 p.

2. Kartashev A.L., Obukhov N.A., Shishkin V.S. *Paket prikladnykh programm dlya proektnogo rascheta profilya i opredeleniya gasodynamicheskikh i tyagovykh kharakteristik kol'tsevykh sopel – “SOKOL”* [Application Package for Design Calculation of Profile and Definition of Gas-dynamic and

Thrust Characteristics of Annular Nozzle – “SOKOL”]. Process description № 103-42-92. Miass, KBM, 1992. 31 p.

3. Trusov B.G. “ASTRA” – *modelirovanie khimicheskikh i fazovykh ravnovesij pri vysokikh temperaturakh* [“ASTRA” – Modeling of Chemical and Phase Balances at High Temperatures]. Moscow, MVTU im. N.E. Baumana, 1989. 37 p.

4. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya*. Spravochnik v desyati tomakh [Thermodynamic and Thermophysical Properties of Combustion Materials. Handbook of ten volumes]. Edited by V.P. Glushko. Moscow, VINITI AN SSSR, 1971, vol. 1. 266 p.

5. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Krayko A.N., Prokopov G.P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Computational Solution of Multi-dimensional Problems of Gas-dynamic]. Moscow, Nauka, 1976. 400 p.

6. Ivanov M.Ya., Krayko A.N., Mihaylov N.V. Method of Transparent Calculation of Two-dimensional and Spatial Supersonic Flows [Metod skvoznogo scheta dvumernykh i prostranstvennykh sverkhzvukovykh techenij]. *Zhurnal vychislitelnoj matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of computational mathematics and mathematical physics], 1972, vol.12, no. 2, pp. 441–463.

7. Kutateladze S.S., Leont'ev A.I. *Turbulentnyy pogranichnyy sloy szhimaemogo gasa* [Turbulent Boundary Layer of Compressible Gas]. Novosibirsk, SO AN SSSR, 1962. 180 p.

8. Chzhen P. *Otryvnye techeniya* [Separated Flows]. Moscow, Mir, 1973, vol. 3. 333 p.

Поступила в редакцию 28 августа 2013 г.