

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. А. Горяйнов, О возможности эффекта реверса течения в свободных сверхзвуковых струях, *Матем. моделирование*, 2003, том 15, номер 7, 86–92

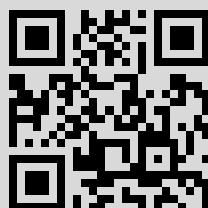
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 92.242.58.12

15 марта 2019 г., 19:23:10



## **О ВОЗМОЖНОСТИ ЭФФЕКТА РЕВЕРСА ТЕЧЕНИЯ В СВОБОДНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЯХ**

© *В.А. Горяйнов*

Московский авиационный институт (государственный технический университет)

Обнаружены зоны реверса в свободных сверхзвуковых струях с использованием модификации схемы Годунова 2-го порядка. Явление реверса наблюдалось в первых двух бочках недорасширенной струи и во второй бочке перерасширенной струи. Определена область существования реверса при комбинации ряда параметров. Часть этой области занимает подобласть сверхзвукового реверса с собственной ударно-волновой структурой. Все тесты так же как и подобный эксперименту положительный градиент давления в зоне реверса подтверждают возможность существования такого физического процесса.

### **SOME POSSIBILITY OF REVERSE PHENOMENON FOR SUPERSONIC FLOWS IN FREE JETS**

*V.A. Goryainov*

Moscow Aviation Institute (State Technical University)

Unstable reverse zones in free supersonic jets is discovered numerically using finite-volume flow solver. Reverse zones may observe behind the Mach disk as in first so and second cells of underexpanded jets and in second cell of overexpanded jets. It's determined the region of reverse origin in Mach number-expansion ratio plane by some initial and others conditions. Part of this region is corresponded to supersonic reverse with own shock structure. All testes as well as similar to experiment centerline contrary pressure gradient in reverse sector is confirmed possibility such physical phenomenon.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Минобразования РФ №Т02-6.8-2841.

С первой половины 70-х годов из работ исследовательских групп под руководством Гинзбурга И.П., Лунева В.В., Глазнева В.Н. и др. известно, что возвратные течения в сверхзвуковых струях могут появляться при натекании нерасчётных струй на безграничные преграды или затупленные тела на режимах нерегулярных (маховских) взаимодействий разрывов и сопровождаются автоколебаниями между тройной конфигурацией (ТК) ударных волн (УВ) и поверхностью тела. В [1,2] показано, что возвратные течения в струе могут быть результатом межфазовой неравновесности или термодинамических возмущений на срезе сопла и при расчетных режимах истечения струи при её натекании на преграду. В настоящей работе обсуждаются физические аспекты, обнаруженного численно в [3,4] реверса течения в свободных сверхзвуковых струях, истекающих в затопленное пространство.

Исследования проводились на базе конечно-разностной аппроксимации уравнений Эйлера в цилиндрических координатах с использованием модификации метода Годунова 2-го порядка точности [5]. Исходя из цели выяснения и разделения схемных и физических составляющих в зафиксированном численно явлении реверса в рамках модели невязкого газа проводилось многопараметрическое исследование по ряду выбранных сеточных и физических параметров по возможности при прочих единообразных условиях. Расчеты проводились в пределах свободной границы струи с одинаковым углом раствора сопел для всей серии; единообразно

предыстории течения обеспечивалось и постоянством расхода на выходе сопла от начального момента времени до установления стационарного или автоколебательного режима и тем, что истечение в начальный момент происходило всегда в покоящийся газ.

Итак, в [3] для некоторой комбинации параметров  $M$ ,  $n$ ,  $\gamma$  и  $\varphi_a$  обнаружено явление реверса в недорасширенных и перерасширенных струях на режимах Маховских взаимодействий скачков уплотнения (СУ). Для понимания условий возникновения реверса течения в свободных сверхзвуковых струях представляет интерес рассмотрение комбинации параметров в области, где возможен переход от классических к аномальным типам течений, включая тестирование ПО на режимах, при которых реализуются хорошо известные классические типы течений.

Рис.1 иллюстрирует режимы течения в нерасчетных струях с регулярными отражениями СУ (рис.1а – недорасширенная струя, рис.1б – перерасширенная струя).

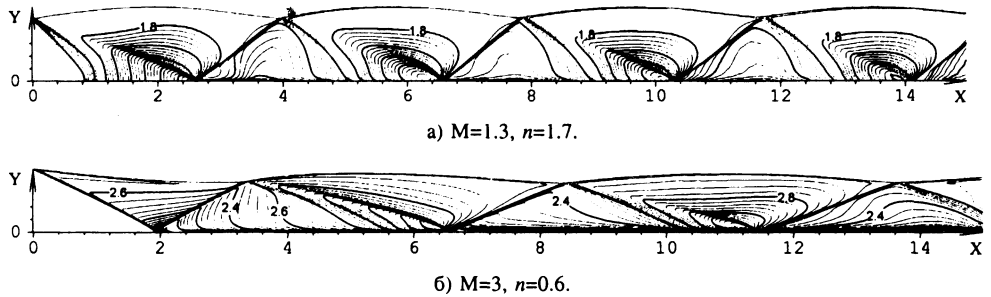


Рис.1. Режимы регулярных отражений скачков уплотнения.

На рис.2 имеем классический тип течения в недорасширенной струе с маховской конфигурацией СУ; несмотря на незначительный положительный градиент давления за диском Маха (предвестник возвратных течений) и соответствующее падение скорости на коротком участке, течение во всей струе происходит в главном направлении и обладает довольно типичными распределениями скорости и давления вдоль оси (рис.4,5, кривые  $M=2, n=3.2$ ). То же утверждение относится и к режиму перерасширенной струи, показанной на рис.3. Характерной особенностью метода Годунова является хорошее разрешение УВ в тройных конфигурациях (ТК), а на рис.3 реже наблюдаемое на неадаптированных сетках хорошее разрешение контактных разрывов позволяет проследить за 2-м диском Маха два параллельных контактных разрыва, исходящих из 1-й и 2-й тройной точки.

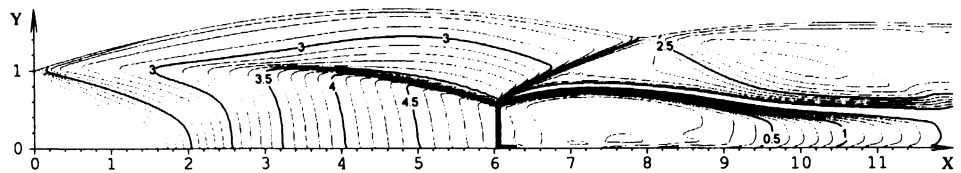


Рис.2. Изолинии числа Маха в струе  $M=2, n=3.2$

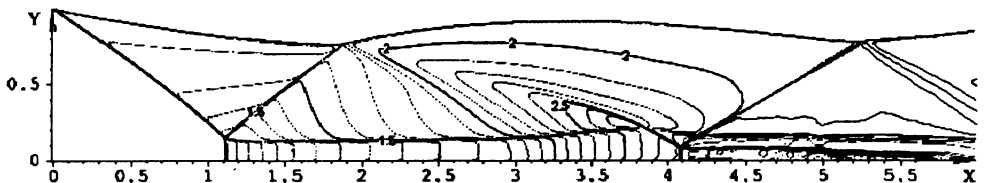


Рис.3. Изолинии числа Маха в струе  $M=2.4, n=0.5$

Для тестирования ПО проведены расчеты режимов течения представленных в известном атласе по сверхзвуковым струям [6], где использовался метод характеристик. Сравнение положения первой тройной точки в перерасширенных струях [3] для серии комбинации параметров  $M$ ,  $n$ , и  $\gamma$  показало хорошее совпадение тестов, полученных с помощью настоящей реализации метода конечных объемов второго порядка, и данных [6].

Таким образом, используемое для данных исследований ПО, позволяет разрешать все известные типы и структуры течений и дает количественное совпадение важных особенностей течения с классическими результатами.

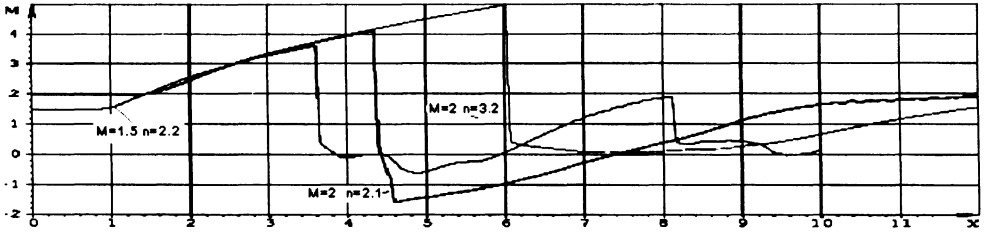


Рис.4. Распределения числа Маха вдоль оси в недорасширенных струях.

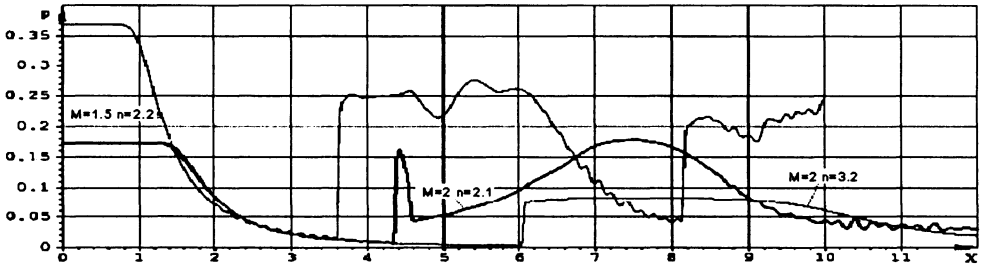


Рис.5. Распределения давления вдоль оси в недорасширенных струях

На представленных на рис.6 изолиниях числа Маха для недорасширенной струи наблюдается более существенная, чем на рис.3, деформация контактного разрыва, при которой его форма приобретает выпуклый характер, что соответствует такому расширению сечения дозвукового потока за диском Маха, когда происходит практически полное торможение течения и появление застойных зон. В дальнейшем нестационарные процессы сопровождаются появлением встречных течений (см. рис.4, кривая  $M=1.5$ ,  $n=2.2$ ). Как и следовало ожидать, в зонах встречных течений наблюдаются перемежающиеся области с положительными градиентами давления (рис.5).

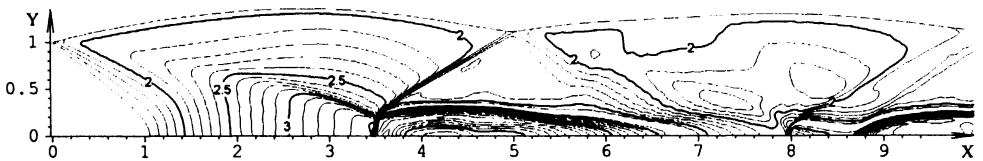
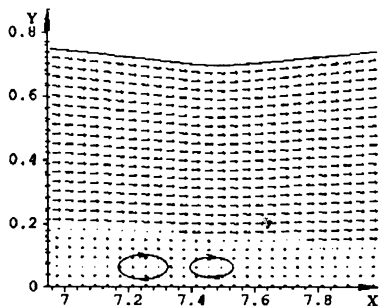


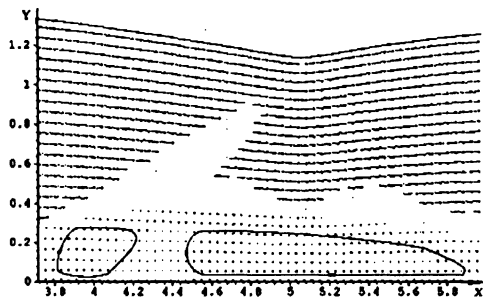
Рис.6. Изолинии числа Маха в струе  $M=1.5$ ,  $n=2.1$ .

На рис.7б, где показано поле вектора скорости для рассматриваемого режима течения в недорасширенной струе, контрастно вырисовываются две циркуляционные зоны в области дозвукового течения за диском Маха. Положение и количество циркуляционных зон здесь меняется со временем.

Аналогичное явление возникновения возвратных течений наблюдается за второй ТК в перерасширенной струе, показанной изолиниями числа Маха на рис.8. Здесь, так же, как и в случае недорасширенной струи (рис.6), контактный разрыв после второй ТК имеет выпуклую форму (в отличие от формы контактного разрыва за первой ТК), а на распределении числа Маха вдоль оси (рис.9, линия  $M=3.5$ ,  $n=0.4$ ) видна область дозвукового возвратного течения.



а)  $M=3.5$ ,  $n=0.4$



б)  $M=1.5$ ,  $n=2.2$

Рис.7. Фрагменты поля вектора скорости в струе

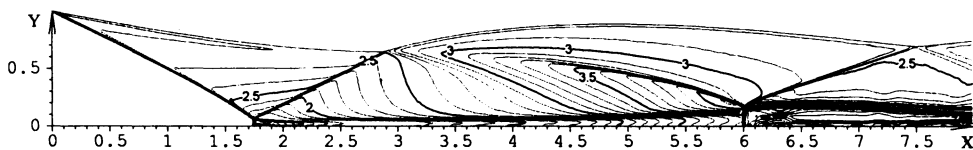


Рис.8. Изолинии числа Маха в струе  $M=3.5$ ,  $n=0.4$ .

На рис.7а в поле вектора скорости наряду с большой циркуляционной зоной за второй ТК в рассматриваемой перерасширенной струе наблюдается серия маленьких циркуляционных зон, которые также являются нестационарными в течении очень большого промежутка времени после формирования второй ТК и установления стационарного режима течения за первой ТК. Следует отметить, что зоны возвратных течений возникают в струях после прохождения головного фронта возмущения, связанного с началом истечения струи из сопла в покоящуюся среду. Далее в процессе режима установления зоны возвратных течений либо исчезают, либо сохраняются в виде нестационарной картины течения на режиме, который интерпретируется как установившийся. Причем, если таковые зоны сохраняются в одной из структур струи (бочек), то и в последующих за ней по потоку структурах с нерегулярными взаимодействиями СУ также будут появляться зоны возвратных течений. Итак, в приведенной серии расчетов реализуются возвратные течения в недорасширенных струях за первой ТК и далее по потоку, а в перерасширенных струях – за второй ТК и далее, но только для случаев маховских взаимодействий СУ.

При определенной комбинации параметров поведение течения в обнаруженных циркуляционных зонах приобретает еще более аномальный характер. В случаях, когда диск Маха имеет малый радиус, после прохождения переднего фронта возмущений через последующую ТК происходит специфическая деформация контактного разрыва, приводящая к увеличению скорости вращения в циркуляционной зоне так, что в окрестности оси скорость встречного течения достигает сверхзвуковых значений.

На рис.11 на изолиниях числа Маха для перерасширенной струи видно, как граница контактного разрыва после второй ТК приближается к оси, это приводит к значительному ускорению течения в циркуляционной зоне с превышением скорости звука (рис.9,  $M_{\max}=-1.3$  на

кривой  $M=3.75$ ,  $n=0.35$ ). На соответствующей кривой на рис.10 наблюдается протяженный (на отрезке 6.1-8.0 вдоль оси) положительный градиент давления. При  $x \sim 6.1$  появляется встречный СУ, при этом диск Маха деформируется и совершает малые колебания относительно среднего положения. На отрезке [6.1, 6.3] вдоль оси на рис.11 видна замкнутая звуковая линия, внутри которой и реализуется встречное сверхзвуковое течение.

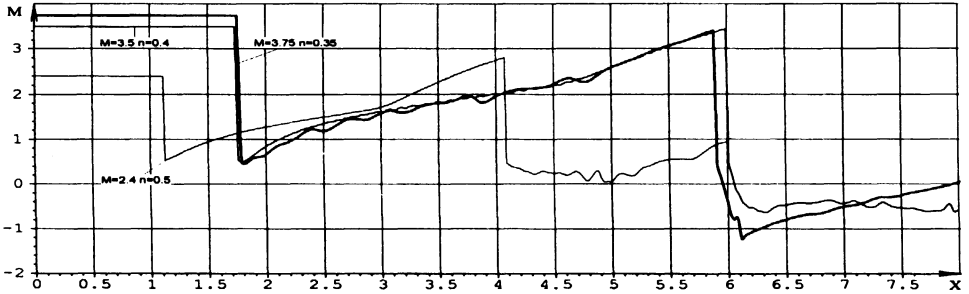


Рис.9. Распределения числа Маха вдоль оси в перерасширенных струях.

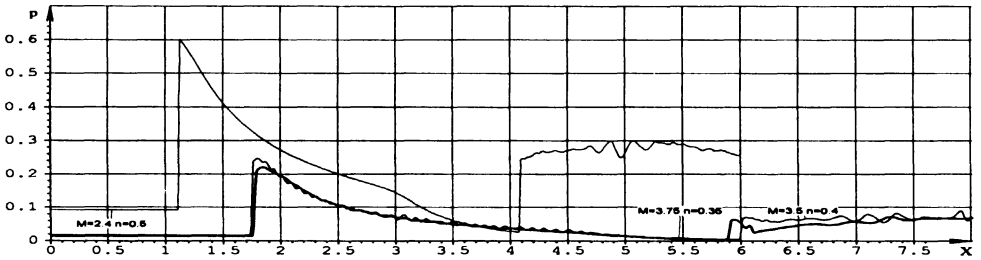


Рис.10. Распределения давления вдоль оси в перерасширенных струях

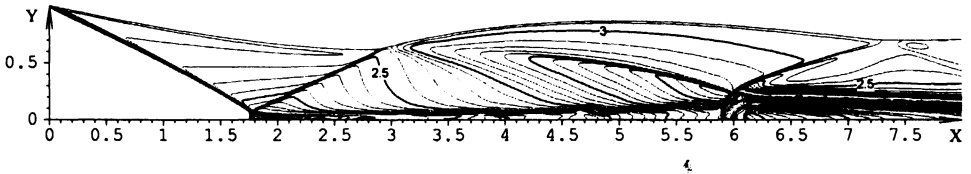


Рис.11. Изолинии числа Маха в струе  $M=3.75$ ,  $n=0.35$ .

В случае недорасширенных струй сверхзвуковое возвратное течение может иметь значительно большую интенсивность по сравнению с аналогичными эффектами в перерасширенных струях. Как видно на рис.4 число Маха в возвратном течении достигает значения -1.6 (нижняя линия, на срезе сопла  $M=2$ ,  $n=2.1$ ). На изолиниях числа Маха (рис.12) наблюдаются те же деформации УВ, что и в рассмотренном выше случае перерасширенной струи. Значительная скорость возвратного течения приводит к интенсивному СУ, который вместе с центральным СУ, создает на распределении давления вдоль оси (рис.5,  $x=4.5$ ) структуру, напоминающую уединенную стоячую волну.

Фактически между этими близко расположенными СУ течение направлено радиально вверх от оси и между ними на оси перед циркуляционной зоной находится точка растекания. Экстремум давления на оси соответствует точке растекания за циркуляционной зоной. В окрестности этой точки вектор скорости направлен к оси. Отмеченные структуры могут одновременно повторяться в последующих бочках [3].

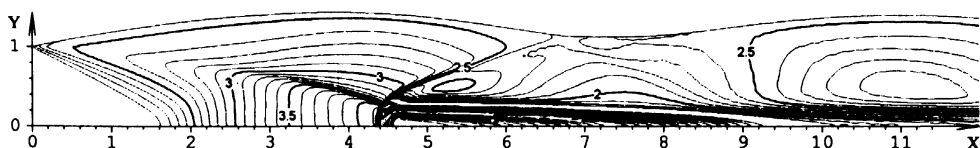


Рис.12. Изолинии числа Маха в струе  $M=2$ ,  $n=2.1$ .

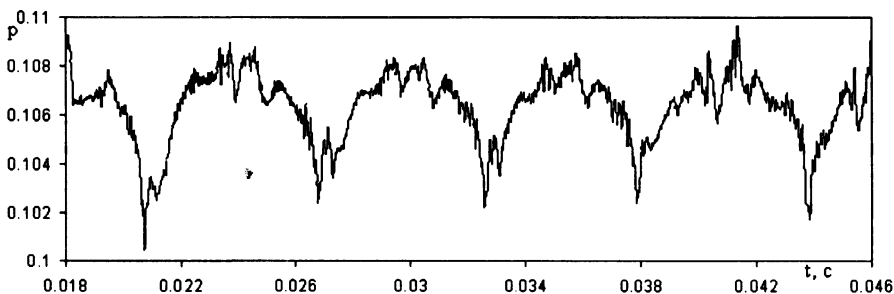


Рис.13. Изменение давления по времени в циркуляционной зоне недорасширенной струи.

Обнаруженный эффект реверса в свободных сверхзвуковых струях встречается при определенной комбинации основных параметров на нерасчетных режимах истечения исключительно при маховских взаимодействиях СУ. Рассмотренный процесс имеет место при стационарных условиях на выходе из сопла и сопровождается нестационарными процессами в области ниже по течению от циркуляционных зон, что иллюстрируется периодическими пульсациями давления в циркуляционной зоне, показанной на рис.13. Приведенная временная диаграмма давления получена через несколько десятков тысяч итераций после прохождения переднего фронта возмущений через правую границу расчетной области и имеет незатухающие колебания на протяжении более пятидесяти тысяч итераций.

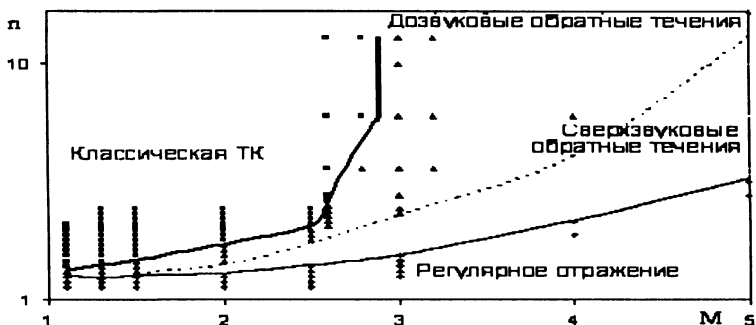


Рис.14. Зависимость конфигурации течения в недорасширенных струях от параметра нерасчетности и числа Маха на срезе сопла.

На сводном рис.14 в плоскости  $n$ - $M$  (нерасчетность – число Маха) наблюдаются области, соответствующие известным типам течений (с регулярными и маховскими отражениями СУ), а также область данных параметров, в которой в условиях параметрического исследования проявляется эффект реверса. Эта область в свою очередь разделяется на две подобласти: значительную по размерам подобласть дозвуковых возвратных течений и узкую подобласть сверхзвуковых возвратных течений.

Для анализа влияния численных эффектов на рассматриваемый процесс исследования проводились при варьировании условий расчетов в широком диапазоне. На правой границе области задавались различные граничные условия, включая так называемые «неотражающие» условия. Изменялась длина области (10-50), параметры сетки (200×20–5000×200); отдельная серия расчетов проведена для случая, когда боковая (верхняя) граница расчетной области задавалась на существенном удалении от свободной границы. Многократное изменение пространственного шага и соответствующее изменение схемной вязкости не исключало возможности проявления эффекта реверса в свободной сверхзвуковой струе. И все другие перечисленные изменения условий расчета не приводили к принципиальному изменению ситуации.

Замечен ряд факторов (деформация контактного разрыва и др.), которые сопутствуют и объясняют эффект реверса в нерасчетных сверхзвуковых струях с маховскими отражениями СУ. Эти факторы имеют физическую природу и не могут являться следствием схемных эффектов. Косвенное подтверждение эффекта реверса в сверхзвуковых струях дает эксперимент [7], где в зоне реверса зафиксирован положительный градиент давления, сходный с расчетными градиентами давления. Все перечисленные результаты позволяют надеяться на наличие физических основ возможности существования эффекта реверса течения в свободных сверхзвуковых струях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.A. Goryainov, S.V. Mirin, Yu.A. Rijov, The Influence Of Thermodynamic Disturbance on Gas Jet Structure. Int. School-seminar "Nonequilibrium Processes and Their Applications", contribut. papers-ANK. Luikov Heat and Mass Transfer Institute BAS, Minsk, 1994, p.72-75.
2. В.А. Горяйнов. Регулирование неравновесных процессов в сверхзвуковых газодисперсных струях. III Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях. Истра-Москва, 2000, с.131-134.
3. V.A. Goryainov. Origins of Circulating Zones In Free Supersonic Jets. CFD Journal, 2001, v.10 , №3, p.396-401. (Abstracts Of The Seventh Russian-Japanese International Symposium On Computational Fluid Dynamics, Computing Centre of the RAS, Addendum V., p.133-134, Moscow, July 2000.)
4. В.А. Горяйнов, А.Ю. Молчанов Нарращивание пространственных сеток в задачах термогазодинамики при фиксированных вычислительных ресурсах // Математическое моделирование, 2001, т.13, №8, с.3-8.
5. С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. Численное решение многомерных задач газовой динамики. -М.: Наука, 1976, 400 с.
6. Г.И. Аверенкова, Э.А. Ашратов и др. Сверхзвуковые струи идеального газа. Ч.2. Истечение струй в затопленное пространство. -М.: Изд. МГУ, 1971, 170 с.
7. В.Н. Глазнев, Ш. Сулейменов. Газодинамические параметры недорасширенных свободных струй. - Наука, СО АН СССР, 1980, 121 с.