

# Numerical Simulation of Flow over Axisymmetric Body with Annular Cavity

I.E. Ivanov<sup>1,2</sup>, I.A. Kryukov<sup>3</sup>, E.V. Larina<sup>1,3</sup>, A. G. Tarasevich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> - Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 121993, Volokolamsk Highway d. 4; MAI, 8-499-158-4998

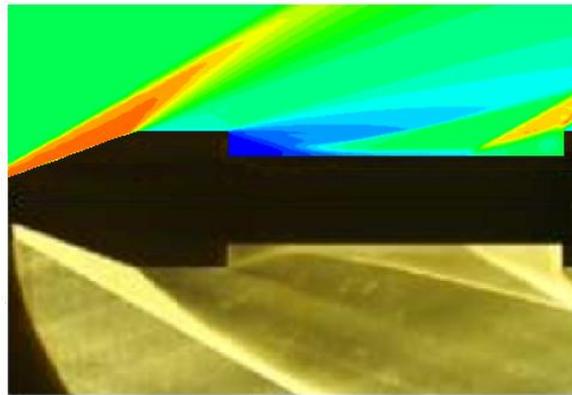
<sup>2</sup> - Moscow State University. Moscow, 119991, Lenin mountains, d. 1,

<sup>3</sup> - Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences. Moscow, 119526, pr. Vernadskogo 101, 1  
kryukov@ipmnet.ru

## Abstract

The numerical simulation of turbulent viscous gas flows in axisymmetric cavities was performed. The influence of the relative length of the cavity on the flow structure in a cavity was numerically investigated in the case of supersonic flow over the body with a cavity. The open or closed type of the flow was obtained depending on the relative length of the cavity. Comparison with experimental data [9,10,13] shows good agreement of obtained results with the experiment. The phenomenon of gas-dynamic hysteresis for the implementation of the open – closed flow type studied experimentally in [10] was numerically reproduced. It has been shown that experimental conditions [13] also may cause this type of hysteresis.

Keywords: axisymmetrical cavity, open or closed flow type, hysteresis.



Comparison of the experimental [10] (bottom half) and numerical (top half) density fields for the closed type of flow.

УДК 533.6 534.13

# Численное моделирование обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной

И.Э. Иванов<sup>1,2</sup>, И.А. Крюков<sup>3</sup>, Е.В. Ларина<sup>1,3</sup>, А.Г.Тарасевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 121993, Волоколамское шоссе д. 4; МАИ, 8-499-158-4998

<sup>2</sup> – Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1,

<sup>3</sup> - Институт проблем механики им. А.Ю.Иилинского РАН, Москва, 119526, просп. Вернадского 101, корп. 1.

kryukov@ipmnet.ru

## Аннотация

В данной работе проведено численное моделирование турбулентных течений вязкого газа в осесимметричных кавернах. Численно исследовалось влияние относительной длины каверны на структуру течения в каверне в случае сверхзвукового обтекания тела с каверной. В зависимости от относительной длины каверны получены открытый или закрытый тип течения. Сравнение с экспериментальными данными [9,10,13] показывает вполне удовлетворительное согласие полученных результатов с экспериментом. Численно воспроизведено явление газодинамического гистерезиса по реализации типа течения (открытое - закрытое), экспериментально изученное в [10]. Показано, что для условий работы [13] тоже возможно возникновение данного вида гистерезиса.

Ключевые слова: осесимметричная каверна, открытый или закрытый тип течения, гистерезис.

## 1. Введение

Практический интерес к течениям возле осесимметричных тел с кольцевой каверной обусловлен довольно широким применением подобных конструкций в аэрокосмической технике. Так же как и в прямоугольных кавернах в зависимости от отношения длины каверны к глубине в осесимметричной каверне могут реализовываться открытый тип течения (короткая каверна) или закрытый (замкнутый) тип течения (длинная каверна). В первом случае в каверне возникает единое кольцевое рециркуляционное течение, а во втором – два, разделенных между собой в противоположных углах каверны. Отдельное внимание многие исследователи уделяют возможным газодинамическим гистерезисам при обтеканиях каверн, связанного с перестройкой режима отрывного обтекания. Так, например, в [9,10] экспериментально было установлено наличие газодинамического гистерезиса по типу течения "открытое - замкнутое" при сверхзвуковом обтекании модели осесимметричного тела с прямоугольным кольцевым вырезом на боковой поверхности цилиндрического корпуса. В [13,14] экспериментально и численно исследовались открытые и закрытые (замкнутые) течения в кольцевой каверне при обтекании осесимметричного тела сверхзвуковым потоком. Для сравнения обзор по течениям в плоских и трехмерных кавернах можно найти в [7], а некоторые экспериментальные результаты в [8].

## 2. Математическая модель, численный метод

В качестве математической модели используется нестационарная двумерная система уравнений Рейнольдса, дополненная двухпараметрической  $k-\varepsilon$  моделью турбулентности. В

работе применялся вариант  $k-\varepsilon$  модели турбулентности, построенный в [3,4] и учитывающий влияние неравновесности турбулентности и сжимаемости. Этот вариант  $k-\varepsilon$  модели апробирован для ряда сверхзвуковых течений и показал вполне удовлетворительные результаты [5,6].

Для численного решения указанной системы уравнений использовался метод, описанный в [1,2]. В качестве базовой схемы для аппроксимации конвективной части системы уравнений используется схема Годунова повышенного порядка точности, члены уравнений описывающие диффузионный перенос аппроксимируются с помощью аналога схемы центральных разностей для неравномерных сеток, источники члены уравнений - с помощью явно-неявного алгоритма [1]. На стенках задавались условия прилипания, на плоскости симметрии – условия симметрии (непротекания), на свободных границах – условия отсутствия отражения возмущений.

### 3. Численное моделирование физического эксперимента [9,10]

В соответствии с описанием эксперимента [9,10] проводилось моделирование обтекания сверхзвуковым потоком  $M=3$  под нулевым углом атаки осесимметричного тела, состоящего из острого конуса и цилиндра, имеющего кольцевой вырез рис. 1.

Угол полураствора конуса  $\beta=20^\circ$ , расстояние от торца конуса до каверны  $l=30$  мм, диаметр цилиндра  $D=45$  мм, глубина каверны (выреза)  $h=8$  мм,  $d=29$  мм.  $d=D-2h$ . Относительная длина каверны  $s=L/h$  изменялась в диапазоне  $10 < s < 15$  за счет изменения  $L$  ( $80 \text{ мм} < L < 120 \text{ мм}$ ).

Расчетная сетка содержала  $400 \times 150$  расчетных ячеек для грубого варианта расчета и  $800 \times 300$  для более точного. На каверну приходится  $160 \times 30$  ячеек и  $320 \times 60$  соответственно.

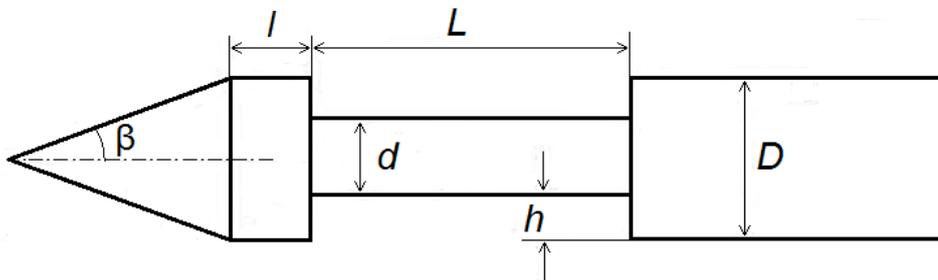


Рис. 1. Схема обтекаемого осесимметричного тела с кольцевой каверной из [10].

При небольших значениях относительной длины каверны  $s < 10$  в экспериментах [9,10] и численных расчетах данной работы в каверне всегда реализовывалось течение открытого типа. В этом случае поток отрывается от передней кромки каверны и прилипает к правой вертикальной стенке каверны в районе задней кромки, внутри каверны реализуется циркуляционное течение, состоящее из одного крупного и возможно нескольких мелких вихрей в угловых областях с дозвуковым режимом течения. Область циркуляционного течения отделяется от внешнего потока зоной смешения.

Были проведены расчеты сверхзвукового ( $M=3$ ) турбулентного ( $Re_\infty = 1.7 \cdot 10^6$ ) обтекания осесимметричных тел с каверной длиной в диапазоне  $L=80 \div 130$  ( $s=10 \div 16.25$ ) (рис. 1)

Параметры в набегающем потоке  $P_\infty = 16770$  Па,  $T_\infty = 96.43^\circ\text{К}$ .

На рис. 2 – 5 показаны результаты расчета обтекания тела при  $L=81$  мм; ( $s=10.125$ ).

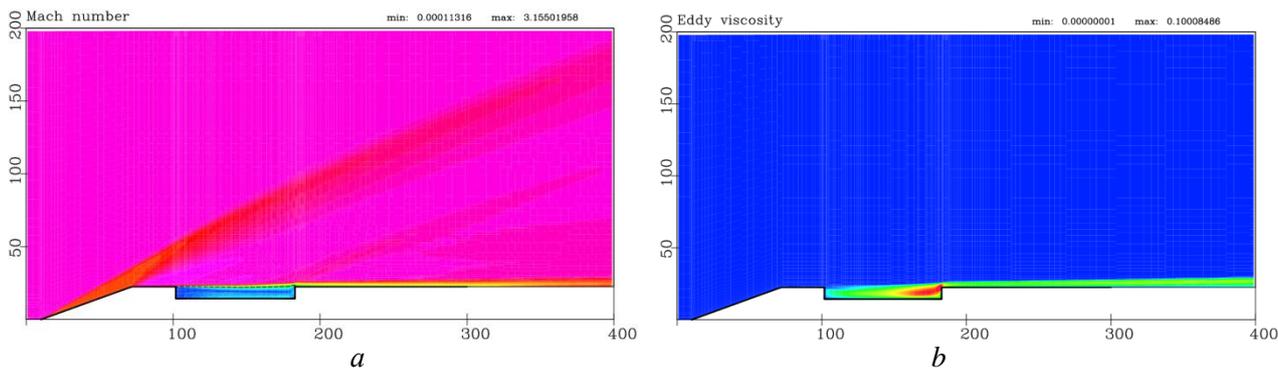


Рис. 2. Поле чисел Маха (а) и турбулентной вязкости (б) при  $L=81$  мм.

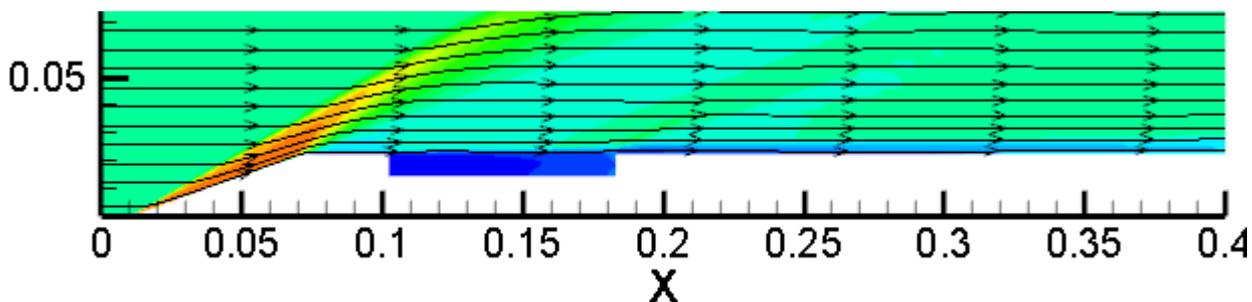


Рис. 3. Поле плотности и линии тока во всей расчетной области  $L=81$  мм.

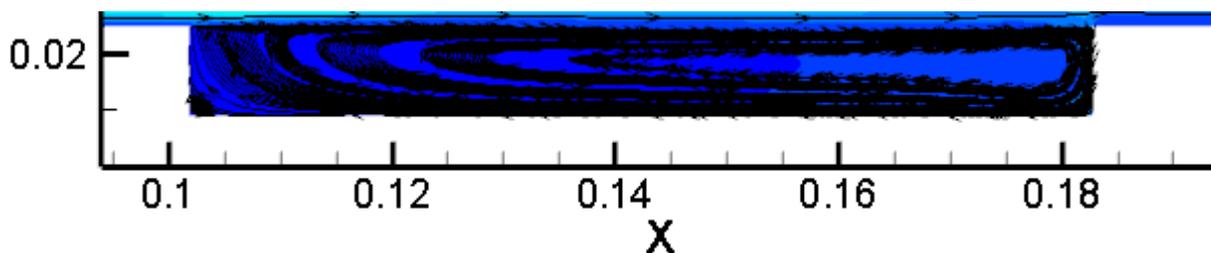


Рис. 4. Поле плотности и линии тока в каверне.

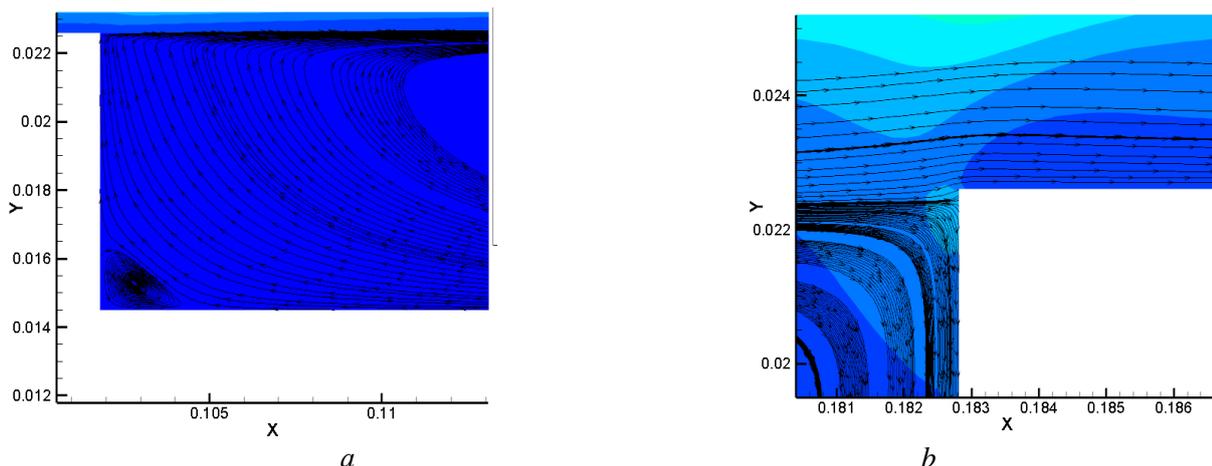


Рис. 5. Траектории газа в передней части каверны за обратной ступенькой (а) и у задней кромки перед прямой ступенькой (б) при  $L=81$  мм.

При превышении относительной длина каверны некоторого критического значения  $s > s_2$  всегда реализуется замкнутой (закрытой) тип течения в каверне. Замкнутое течение характеризуется наличием двух невзаимодействующих или слабо взаимодействующих отрывных зон, первая отрывная зона (рис. 8а) за передним обратным уступом, другая зона перед задним, прямым уступом (рис.8б). Эти зоны разделены внешним потоком вдоль дна

каверны. Течение во внешнем потоке характеризуется наличием интенсивных ударных волн и волн разрежения, обусловленных обтеканием сверхзвуковым потоком угловых областей образованных отрывными пузырями.

На рис. 6 – 10 показаны результаты расчета обтекания тела при  $L = 110$  мм ( $s = 13.75$ ).

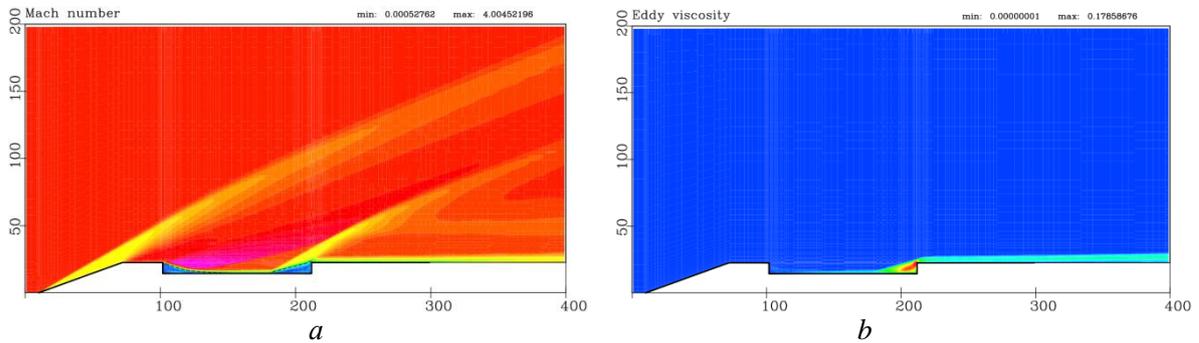


Рис. 6. Поле чисел Маха (а) и турбулентной вязкости (б) при  $L = 110$  мм.

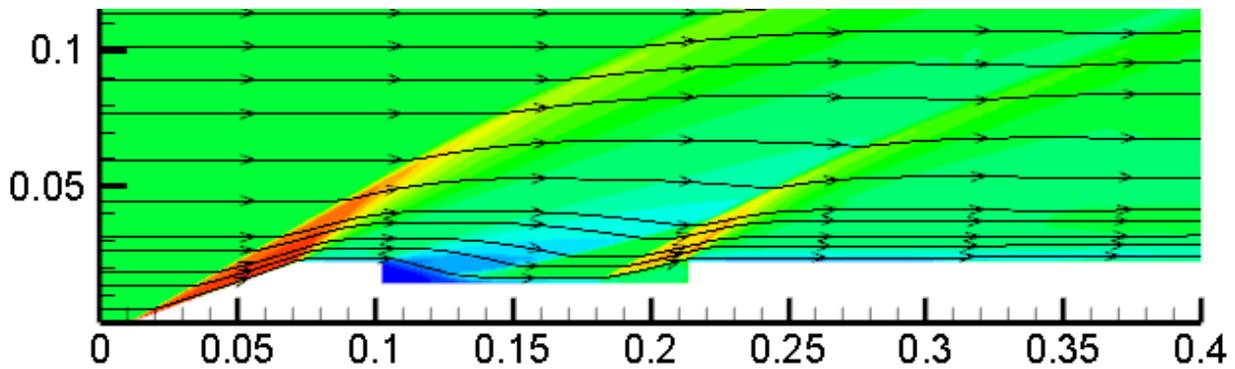


Рис. 7. Поле плотности и линии тока во всей расчетной области  $L = 110$  мм.

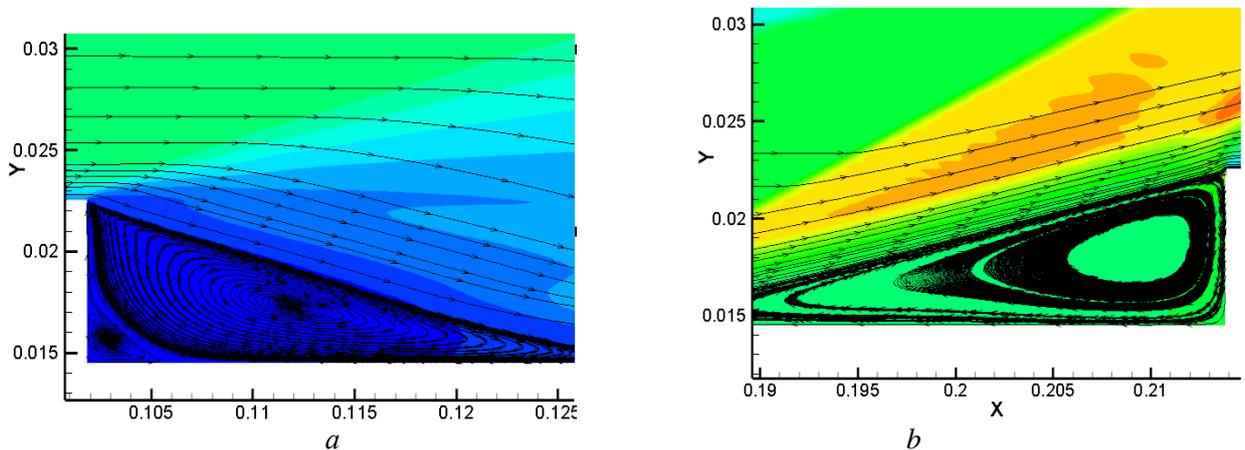


Рис. 8. Траектории газа в передней части каверны за обратной ступенькой (а) и у задней кромки перед прямой ступенькой (б) при  $L = 110$  мм.

Как уже отмечалось, при небольших значениях относительной длины каверны ( $s < 10$ ) в каверне реализуется открытое течение, при котором течение внутри каверны, образованное несколькими вихрями, отделено от внешнего течения слоем смешения от передней до задней кромки каверны (рис.9 а). Слой смешения выгнут в сторону внешнего течения. По мере увеличения  $s$  слой смешения прогибается в сторону дна каверны, при этом претерпевает деформацию вихревое течение внутри каверны: основной вихрь внешне приобретает форму бабочки, а течение во внешнем потоке приближается к дну каверны. По достижении

с некоторого критического значения верхняя и нижняя граница вихревого течения сближаются настолько, что из-за вязкого взаимодействия направленных навстречу друг другу потоков в пограничном слое вдоль дна каверны и в слое смешения происходит разрыв одного большого вихря с образованием двух вихрей за прямой ступенькой и перед обратной ступенькой, разделенных внешним потоком вдоль дна каверны (рис.9 б).

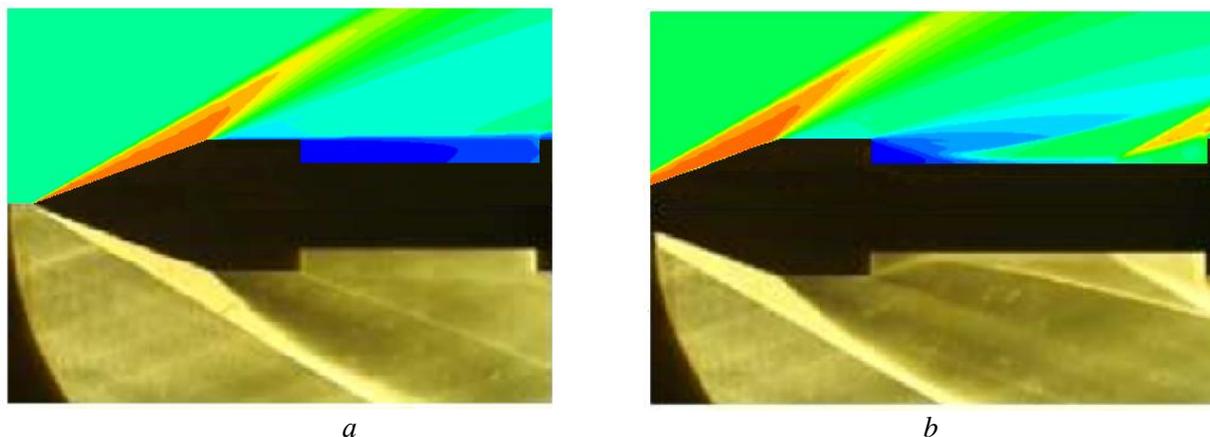


Рис. 9. Визуализация поля плотности в физическом [10] (нижняя часть рисунка) и численном (верхняя часть) эксперименте для (а) открытого типа ( $L = 81$ ) и (б) замкнутого типа ( $L = 110$ ) течения.

В результате численных исследований определены критические значения относительной длины каверны, когда происходит перестройка структуры течения от открытого типа к замкнутому  $s_1 = 10.2$  ( $L = 81.5$  мм), и наоборот от замкнутого типа к открытому  $s_2 = 13.8$  ( $L = 110.5$  мм). В промежутке между значениями  $s_1$  и  $s_2$  в зависимости от предыстории развития течения может реализоваться либо открытое, либо замкнутое течение.

Наличие газодинамического гистерезиса иллюстрируется зависимостью давления, измеренного в середине дна каверны и у дна на задней стенке каверны, от длины каверны, приведенной на рис. 10. Красные кривые рис. 10 а,б получены при возрастающем  $s$ , при этом течение изменяется от открытого типа к замкнутому, а зеленые линии на рис. 10 а,б получены при убывающем  $s$ , в этом случае течение изменяется от замкнутого типа к открытому типу течения. Таким образом, численно получен газодинамический гистерезис по типу течения "открытое – замкнутое" при сверхзвуковом обтекании модели осесимметричного тела с прямоугольным кольцевым вырезом на боковой поверхности цилиндрического корпуса при изменении длины выреза.

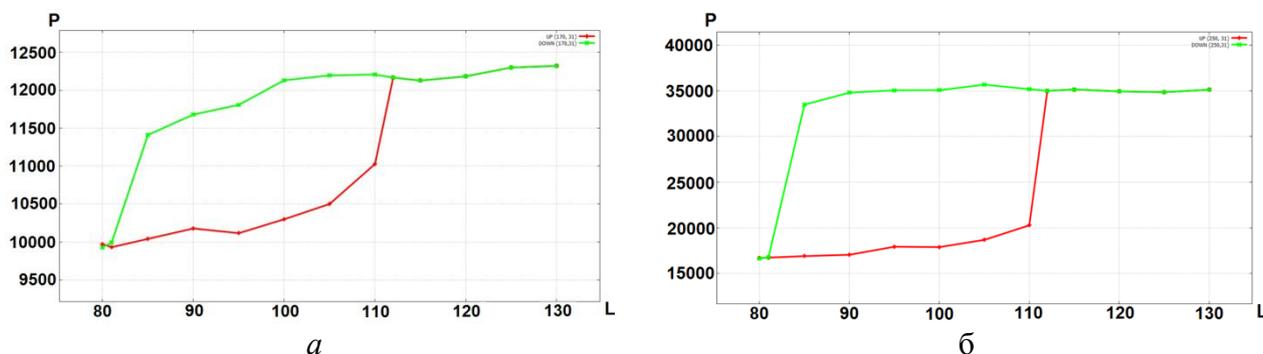


Рис. 10. Зависимость давления  $P$  [Па] от длины каверны  $L$  [мм] в середине дна каверны (а) и у дна на задней стенке каверны (б).

Данные результаты удовлетворительно (с точностью до 0.5 мм по точкам перехода) совпадают с экспериментальными результатами из [10].

#### 4. Численное моделирование физического эксперимента [13]

В данном случае проводилось моделирование обтекания сверхзвуковым потоком  $M=2.2$  под нулевым углом атаки осесимметричного тела, состоящего из острого конуса и цилиндра, имеющего кольцевой вырез рис. 11, что соответствует эксперименту [13]. В отличие от предыдущего случая каверна начинается сразу за конусом.

Угол полураствора конуса  $\beta=16^\circ$ , вырез (каверна) расположен непосредственно за конусом, диаметр цилиндра  $d=9$  мм, диаметр цилиндра  $D=15$  мм, глубина каверны (выреза)  $h=3$  мм,  $D=d+2h$ . Относительная длина каверны  $s=L/h$  изменялась в диапазоне  $1.67 < s < 14.33$  за счет изменения  $L$  ( $3 \text{ мм} < L < 41 \text{ мм}$ ). Давление в набегающем потоке  $P_\infty = 25250 \text{ Па}$ ;  $T_\infty = 146.34^\circ\text{К}$ ;  $Re_\infty = 0.87 \cdot 10^6$ .

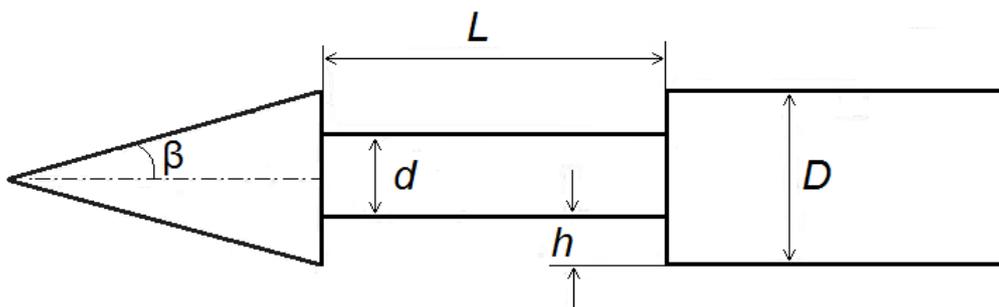


Рис. 11. Схема обтекаемого осесимметричного тела с кольцевой каверной из [13].

На рис. 12 видно, что в каверне при  $L=37$  мм реализуется течение с двумя отрывными зонами, первая образуется отрывом пограничного слоя от передней кромки каверны и прилипанием к стенке, образующей дно каверны, (течение за прямым уступом). Вторая отрывная зона заключается между точкой отрыва пограничного слоя от дна каверны и точкой прилипания на задней кромке каверны (течением за обратным уступом). Две эти отрывные зоны разделены областью внешнего течения вдоль дна каверны и не оказывают заметного влияния друг на друга при больших значениях длины каверны  $L$ .

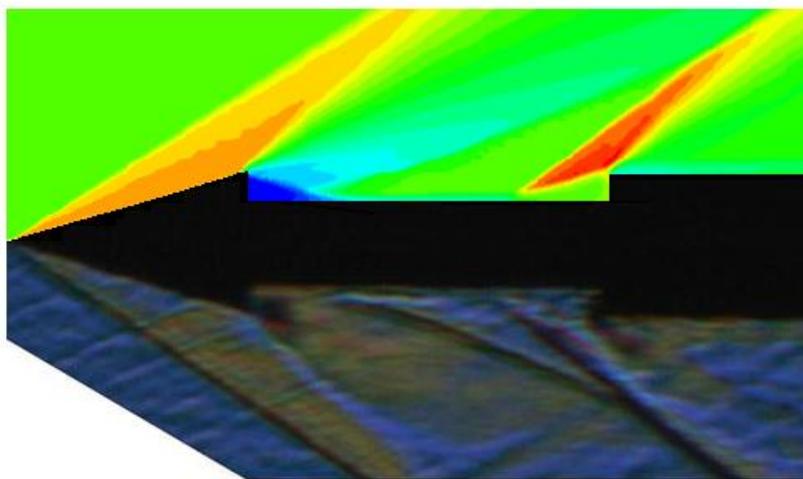


Рис. 12. Визуализация поля плотности в физическом [13] (нижняя часть рисунка) и численном (верхняя часть) эксперименте для замкнутого типа ( $L=37$  мм;  $s=12.33$ ) течения.

## 5. Анализ расчетных результатов и сопоставление с экспериментом

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных на рис. 12 и 13 показывает, что существует хорошее совпадение результатов по структуре течения (рис.12): по протяженности отрывных зон, положению ударных волн и вееров волн разрежения и удовлетворительное по локальным параметрам течения: распределению относительного давления на дне каверны (рис. 13). По положению областей возрастания давления относительно хорошо предсказаны точки присоединения и отрыва потока от дна каверны. Уровень давления во внешнем потоке у дна полости в расчетах на 5–8% выше, чем в эксперименте. Наиболее сильное различие в уровне давления фиксируется в отрывной зоне за обратной ступенькой на расстоянии до 3 мм за конусом, здесь относительное давление в эксперименте  $P/P_\infty < 0.2$ , а в расчетах  $P/P_\infty = 0.28 - 0.3$ . Данное расхождение можно объяснить следующими соображениями: в эксперименте, как указывается в работе [13], головной конус осесимметричного тела обтекается в ламинарном режиме, для турбулизации потока за конусом вставлен зубчатый диск, примыкающий непосредственно к торцу обратной ступеньки и имеющий диаметр несколько больший диаметра  $D$ . В результате этого в каверне устанавливается турбулентный режим течения с характерной структурой течения рис. 12. В расчетных исследованиях, в силу особенностей  $k-\varepsilon$  модели турбулентности ламинарно-турбулентный переход происходит непосредственно вблизи вершины конической части тела и, таким образом, почти вся коническая часть обтекается в турбулентном режиме. Отличие в режиме обтекания конуса в расчетах и экспериментах, а так же в параметрах турбулентности в самой каверне, может привести к различиям уровней расчетного и экспериментального давления в передней отрывной зоне (донного давления).

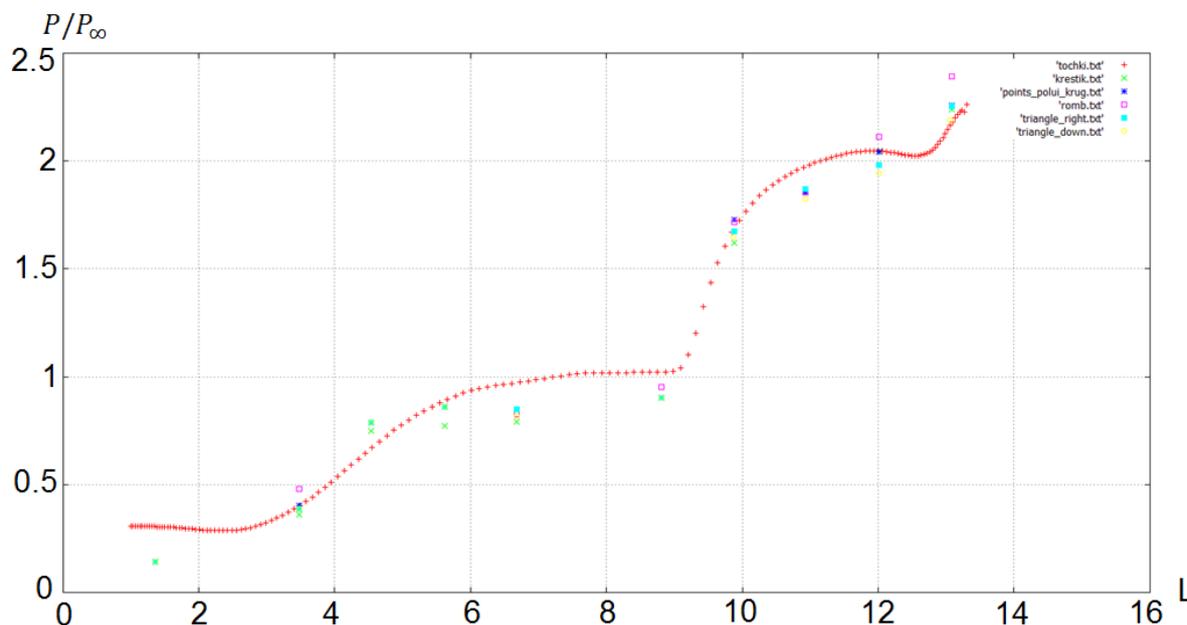


Рис. 13. Распределение относительного давления на дне каверны в эксперименте работы [13] (маркеры) и расчете (кривая из красных точек  $L = 37$  мм,  $s = 12.33$ ).

В работе [11] (в главе “Донное давление за уступами” стр. 90) приведена обработка экспериментальных и расчетных данных по обтеканию острых конусов сверхзвуковым потоком воздуха. Определена зависимость донного давления от числа Маха в набегающем потоке рис. 14. Для обтекания конуса с полууглом раствора 15 градусов потоком воздуха  $M = 2.2$  относительное донное давление принимает значения  $P/P_\infty = 0.31 - 0.46$ , что несколько превышает давление за уступом в расчетах настоящей работы и существенно больше, чем давление, измеренное в эксперименте из работы [13].

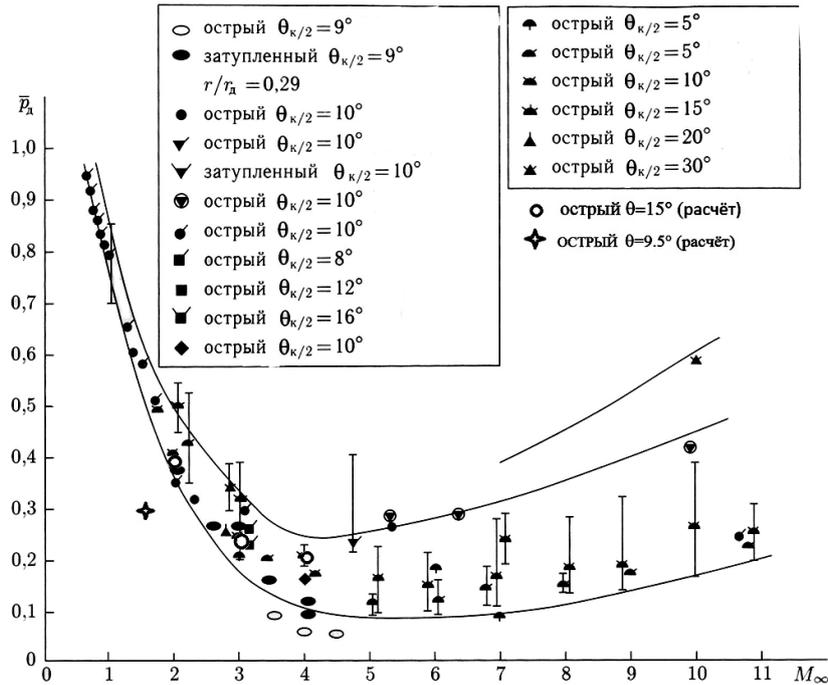


Рис. 14. Донное давление за конусами (обработка экспериментальных данных из монографии [11]).

Среднее донное давление, отнесенное к давлению в набегающем потоке, в случае обтеканием потоком с числом Маха  $M = 2.2$  и при показателе изоэнтропы газа  $\gamma$  хорошо описывается полуэмпирической формулой:

$$P_b = 0.15 + \frac{1}{\left(1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}}}, \quad (1)$$

полученной в ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН [12] на основе многочисленных экспериментальных данных в диапазоне чисел Маха  $1.5 = 4$  [15]. В данном расчетном случае для  $M = 2.2$  и  $\gamma = 1.4$  эта формула дает оценку значения донного давления  $P/P_\infty = 0.46$ , что соответствует значению для данного числа Маха на верхней кривой рис.14.

В результате проведенных расчетных исследований обнаружен газодинамический гистерезис по типу течения “открытое–замкнутое” аналогичный [9,10] с критическими параметрами относительной длины каверны  $s_1 = 10.5$  и  $s_2 = 12.75$ . В работе [13] газодинамический гистерезис экспериментально не устанавливался.

## 6. Заключение

Численно исследуется сверхзвуковое турбулентное течение около осесимметричного тела с кольцевой каверной. Численно моделируются два физических эксперимента для Маха набегающего потока  $M = 3.0$  и  $M = 2.2$ . В зависимости от относительной длины каверны реализуется либо открытый, либо замкнутый тип течения. Численно воспроизведено явление газодинамического гистерезиса по реализации типа течения (открытое–замкнутое) для условий, описанных в двух экспериментальных исследованиях.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ грант №13–01–00533а, №14–08–00294, №14–08–01286.

## Литература

1. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Метод расчета турбулентных сверхзвуковых течений // Математическое моделирование. 2009. Т. 21 № 12. С.103–121.
2. Иванов И.Э., Крюков И.А. Квазилинейный метод повышенного порядка для расчета внутренних и струйных течений вязкого газа // Математическое моделирование РАН, 1996, 8, 6, С.47–55.
3. Крюков И.А. Расчет сверхзвуковых турбулентных течений // Вестник Московского авиационного института, 2009, 16, 2, С.101–108.
4. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Моделирование турбулентности в сверхзвуковых струйных течениях // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. 8с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/142/>
5. Иванов И.Э., Крюков И. А., Ларина Е.В. Численное моделирование взаимодействия ударных волн с пограничными слоями для течения в угле сжатия // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т.14, вып. 4. 7с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2013-14-4/articles/424/>
6. Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Численное исследование высокоскоростного течения вязкого газа в воздухозаборниках // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 4. 10с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/240/>
7. Lawson S.J., Barakos G.N. Review of numerical simulations for high-speed, turbulent cavity flows. Progress in Aerospace Sciences, V.47, 2011, Pp. 186–216.
8. Котов М.А., Рулева Л.Б., Солодовников С.И., Суржиков С.Т. Исследование ударно-волновых процессов обтекания клиновидных моделей с кавернами в гиперзвуковой ударной аэродинамической трубе // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 3. 5с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-3/articles/223/>
9. Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Симоненко М.М., Швец А.И. Экспериментальное исследование трехмерного сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. №4. С. 136–142.
10. Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Симоненко М.М. О наблюдении аэродинамического гистерезиса при сверхзвуковом обтекании кольцевой каверны на осесимметричном теле // Успехи механики сплошных сред. 2013. С. 1–9.
11. Лаврухин Г.Н., Попович К.Ф. Аэрогазодинамика реактивных сопел. Том 2 (обтекание донных уступов потоком газа) М.; ФИЗМАТЛИТ. 2009, 312 с.
12. Зубков А.И., Гаранин А.Ф., Сафронов В.Ф., Сухановская Л.Д., Третьяков П.К., Сверхзвуковое обтекание осесимметричных тел при горении в передних и донных зонах отрыва // Теплофизика и аэромеханика, 2005, Т. 12, № 1.
13. Mohri K., Hillier R. Computational and experimental study of supersonic flow over axisymmetric cavities // Shock Waves. 2011. Vol. 21. Pp. 175–191.
14. Sinha J. Studies on the Transition of the Flow Oscillations over an Axisymmetric Open Cavity Model // Advances in Aerospace Science and Applications. Vol. 3. №2. 2013. Pp.83–90.
15. Луцкий А.Е., Меньшов И.С., Ханхасаева Я.В. Использование метода свободной границы для решения задач обтекания движущихся тел // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 93. 16 с.

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2015 г.