

Numerical Simulation of Flow over Axisymmetric Body with Annular Cavity

I.E. Ivanov^{1,2}, I.A. Kryukov³, E.V. Larina^{1,3}, A. G. Tarasevich¹

¹ *Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 121993, Russia*

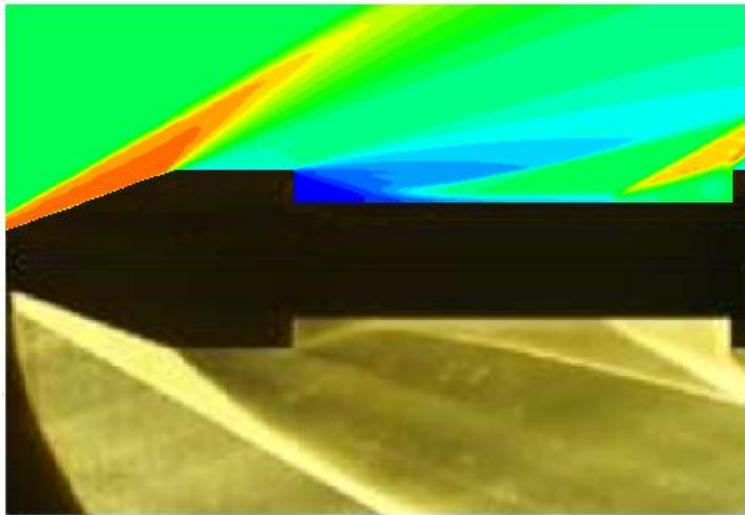
² – *Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119991, Russia*

³ - *Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russia
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^{1,2}, И.А. Крюков³, Е.В. Ларина^{1,3}, А.Г.Тарасевич¹

¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия, Москва, 121993, Волоколамское шоссе, 4*

² *Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, 1*

³ *Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН,
Россия, 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.

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].

1. Математическая модель, численный метод

В качестве математической модели используется нестационарная двухмерная система уравнений Рейнольдса, дополненная двухпараметрической k - ε моделью турбулентности. В

работе применялся вариант k - ϵ модели турбулентности, построенный в [3, 4] и учитывающий влияние неравномерности турбулентности и сжимаемости. Этот вариант k - ϵ 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.

2. 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 кольцевую 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 400×150 расчетных ячеек для грубого варианта расчета и 800×300 для более точного. На каверну приходится 160×30 ячеек и 320×60 соответственно.

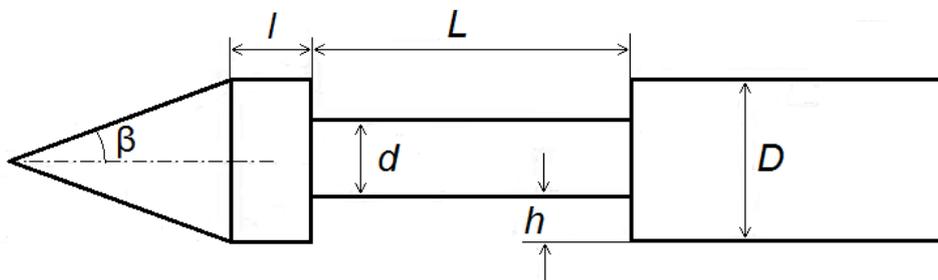


Рис. 1. Схема обтекаемого осесимметричного тела с кольцевой каверной из [10]

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 ($Re_\infty=1.7 \times 10^6$) обтекания осесимметричных тел с каверной длиной в диапазоне $L=80-130$ ($s=10-16.25$) (см. рис. 1)

Параметры в набегающем потоке $P_\infty=16770$ Па, $T_\infty=96.43$ К.

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

При превышении относительной длины каверны некоторого критического значения $s > s_2$ всегда реализуется замкнутое (закрытое) тип течения в каверне. Замкнутое течение характеризуется наличием двух невзаимодействующих или слабовзаимодействующих от-

рывных зон, первая отрывная зона (рис. 8, *а*) за передним обратным уступом, другая зона перед задним, прямым уступом (рис. 8, *б*). 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.

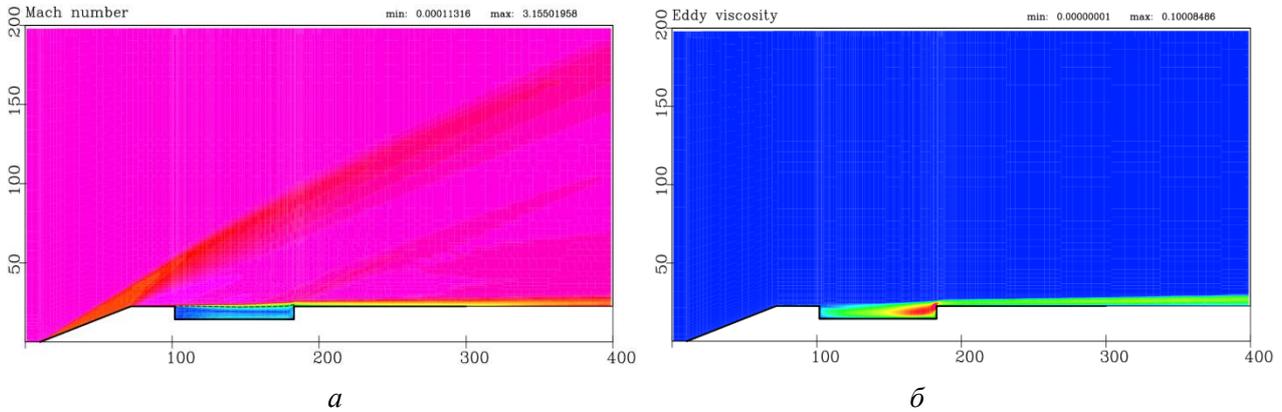


Рис. 2. Поле чисел Маха (*а*) и турбулентной вязкости (*б*) при $L=81$ мм

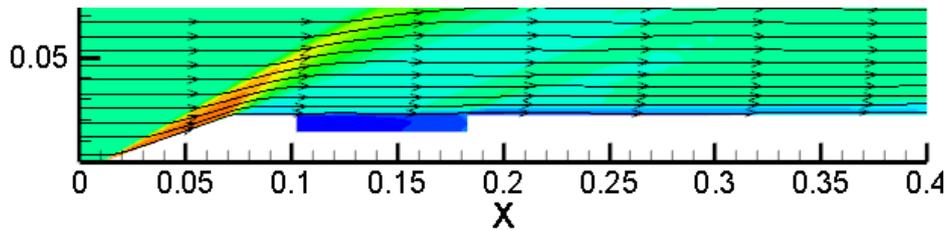


Рис. 3. Поле плотности и линии тока во всей расчетной области $L=81$ мм

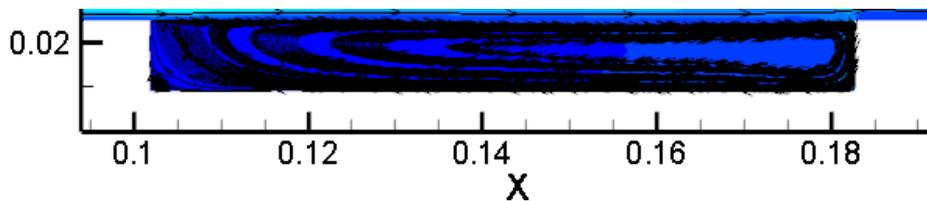


Рис. 4. Поле плотности и линии тока в каверне

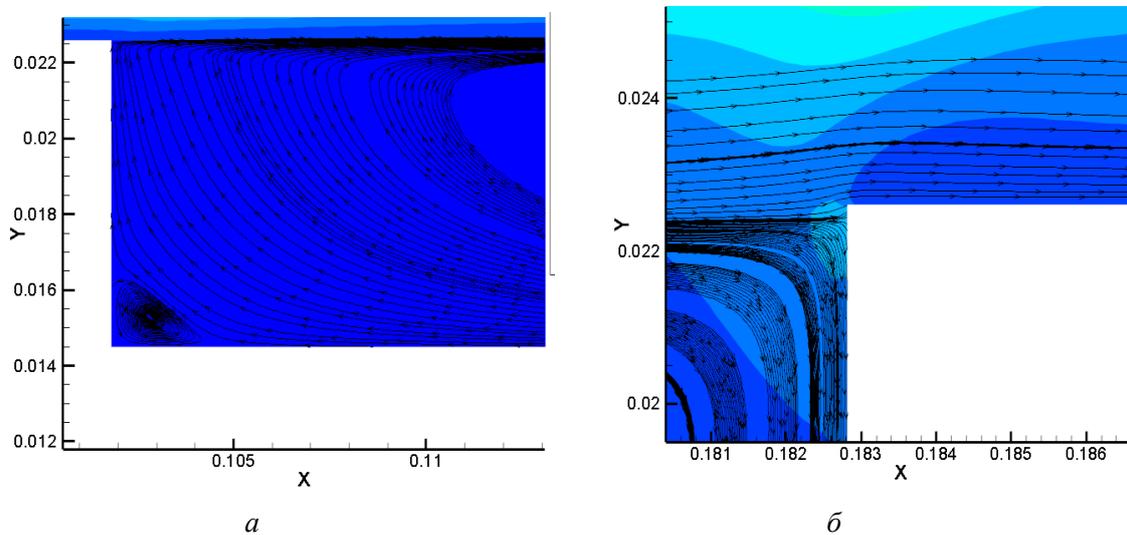


Рис. 5. Траектории газа в передней части каверны за обратной ступенькой (*а*) и у задней кромки перед прямой ступенькой (*б*) при $L=81$ мм

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

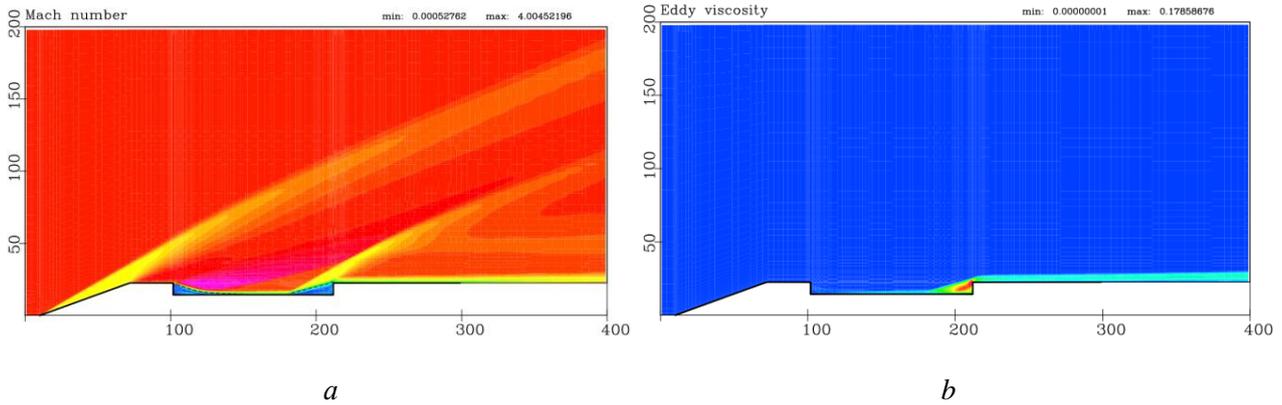


Рис. 6. Поле чисел Маха (*a*) и турбулентной вязкости (*б*) при $L=110$ мм

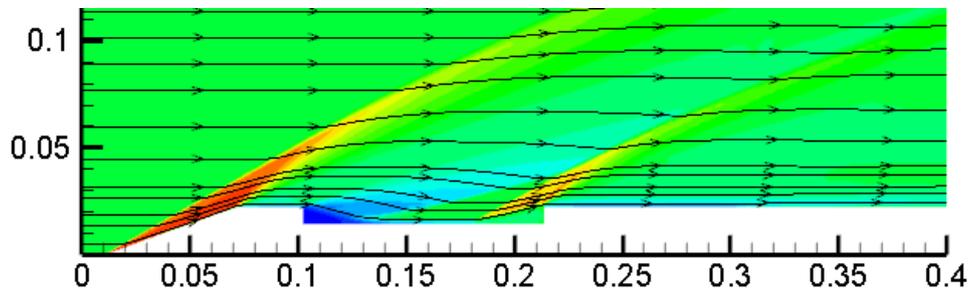


Рис. 7. Поле плотности и линии тока во всей расчетной области $L=110$ мм

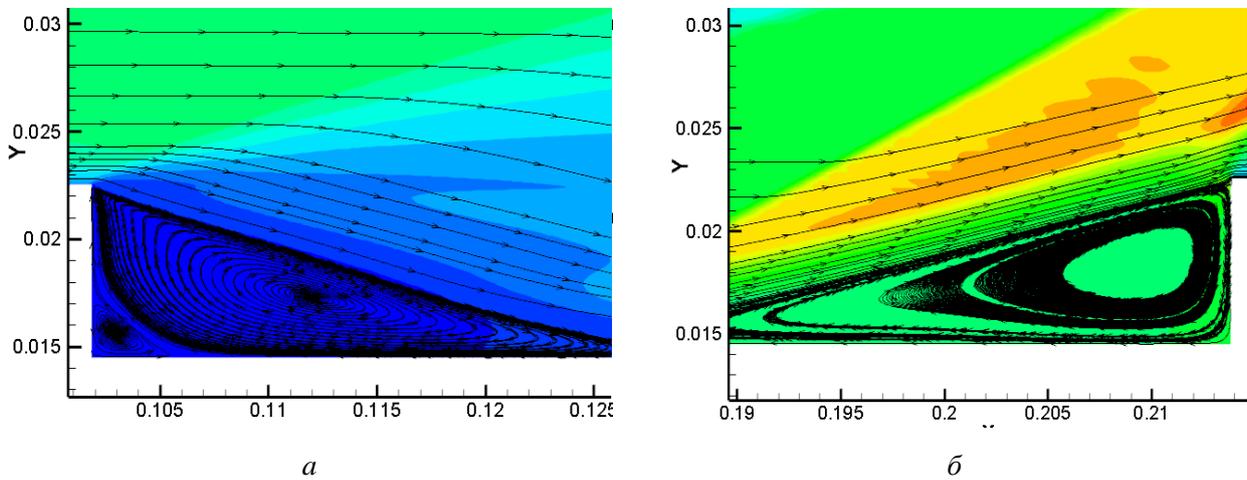


Рис. 8. Траектории газа в передней части каверны за обратной ступенькой (*a*) и у задней кромки перед прямой ступенькой (*б*) при $L=110$ мм

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, *a*). 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 s некоторого критического значения верхняя и нижняя граница вихревого течения сближаются настолько, что из-за вязкого взаимодействия направленных навстречу друг другу по-

токов 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).

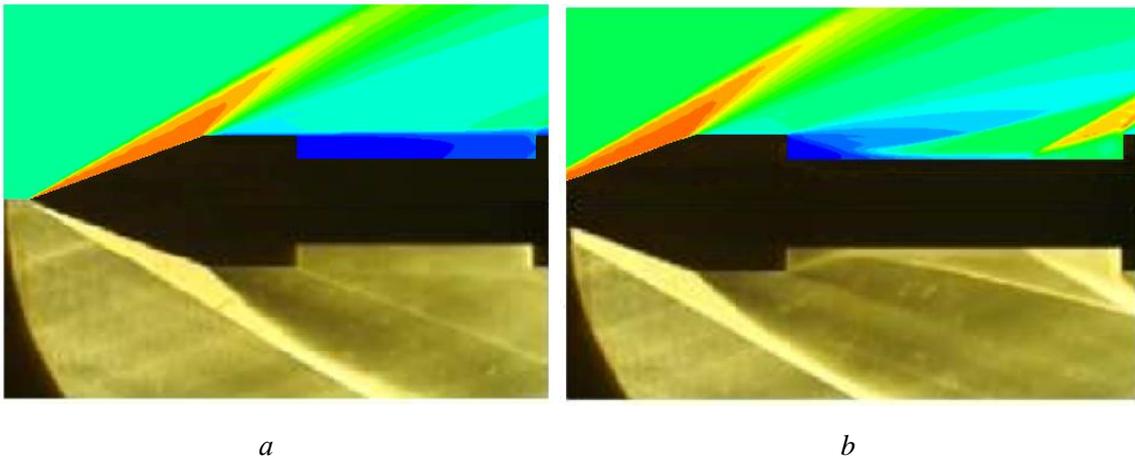


Рис. 9. Визуализация поля плотности в физическом [10] (нижняя часть рисунка) и численном (верхняя часть) эксперименте для (а) открытого типа ($L=81$) и (б) замкнутого типа ($L=110$) течения

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.

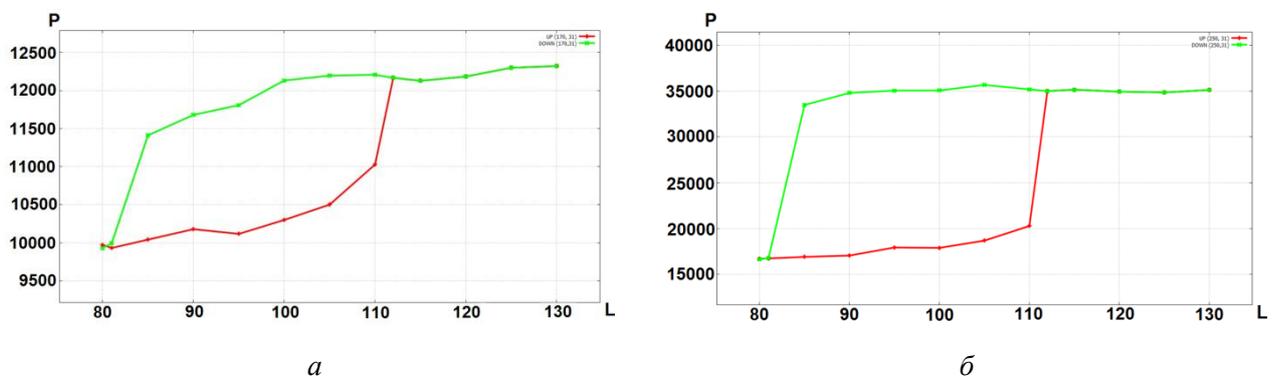


Рис. 10. Зависимость давления P [Па] от длины каверны L [мм] в середине дна каверны (а) и у дна на задней стенке каверны (б)

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

3. 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 $P_\infty=25250$ Па; $T_\infty=146.34$ К; $Re_\infty=0.87 \times 10^6$.

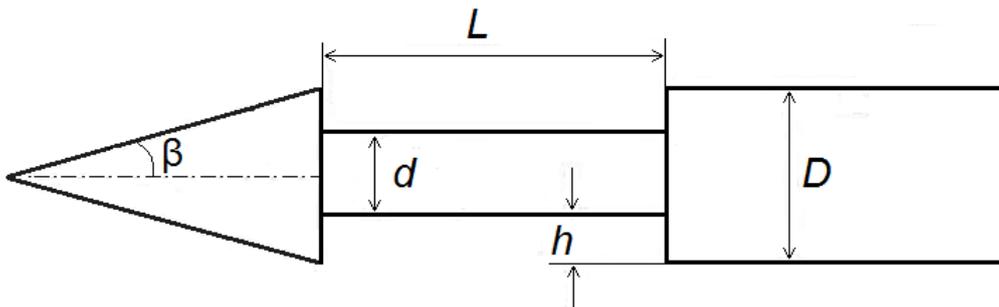


Рис. 11. Схема обтекаемого осесимметричного тела с кольцевой каверной из [13]

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 .

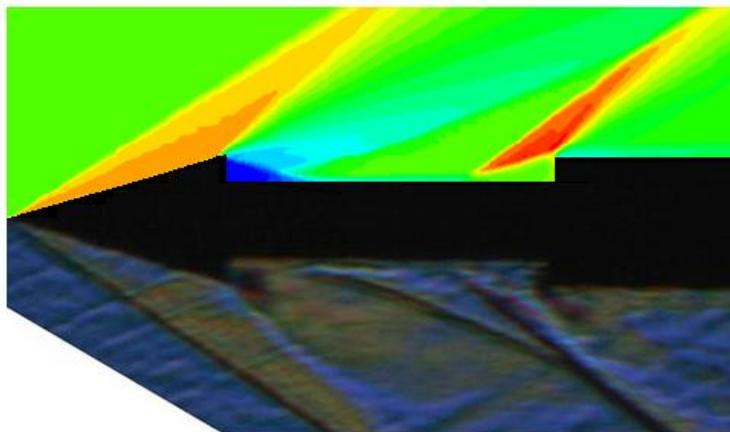


Рис. 12. Визуализация поля плотности в физическом [13] (нижняя часть рисунка) и численном (верхняя часть) эксперименте для замкнутого типа ($L=37$ мм; $s=12.33$) течения

4. 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 удовлетво-

рительное 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 $5 \div 8\%$ 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 $P/P_\infty < 2$, а в расчетах $P/P_\infty = 0.28 \div 0.3$. 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 $k-\epsilon$ 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).

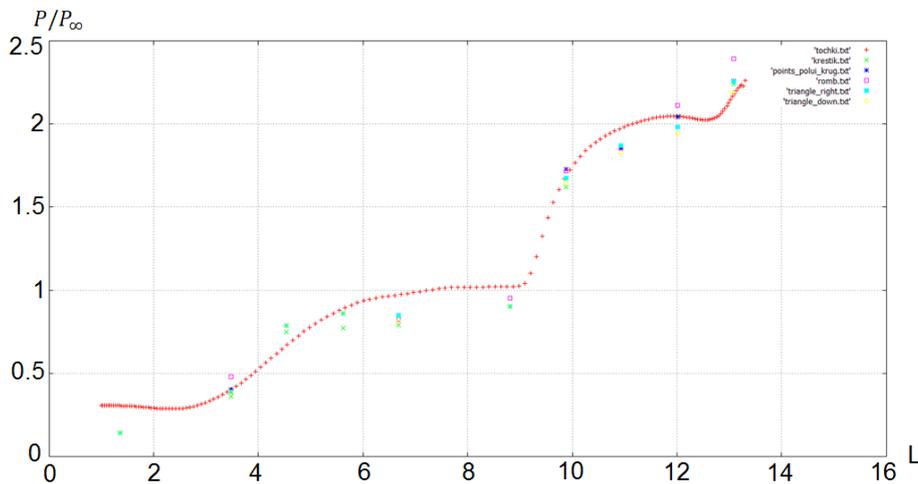


Рис. 13. Распределение относительного давления на дне каверны в эксперименте работы [13] (маркеры) и расчете (кривая из красных точек $L = 37\text{мм}$, $s = 12.33$)

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 $P/P_\infty = 0.31 \div 0.46$, что несколько превышает давление за уступом в расчетах настоящей работы и существенно больше, чем давление, измеренное в эксперименте из работы [13].

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

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

полученной в ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН [12] на основе многочисленных экспериментальных данных в диапазоне чисел Маха $1.5 \div 4$ [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.

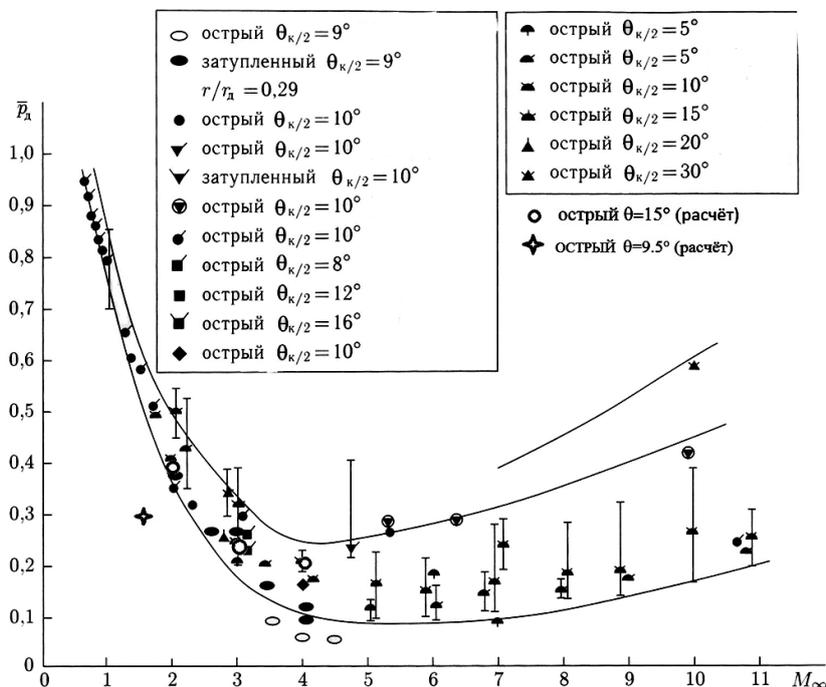


Рис. 14. Донное давление за конусами (обработка экспериментальных данных из монографии [11])

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.

5. 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. Квазимонотонный 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. <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. <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. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/240/>
7. Lawson S.J., Varakos G.N. Review of numerical simulations for high-speed, turbulent cavity flows. Progress in Aerospace Sciences, Vol. 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. <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.