

Supersonic Flow around an Annular Cavity on an Axisymmetric Pointed Body

M. M. Simonenko

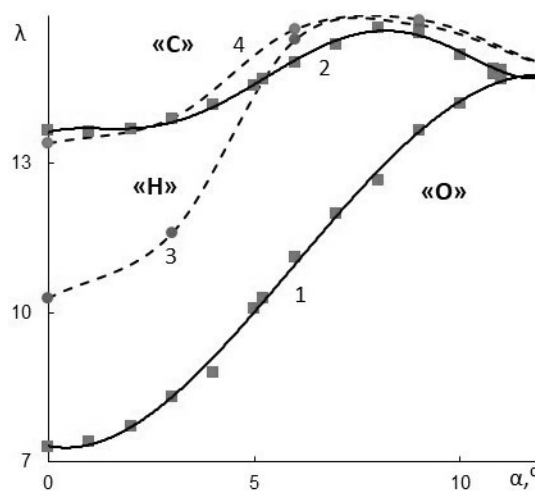
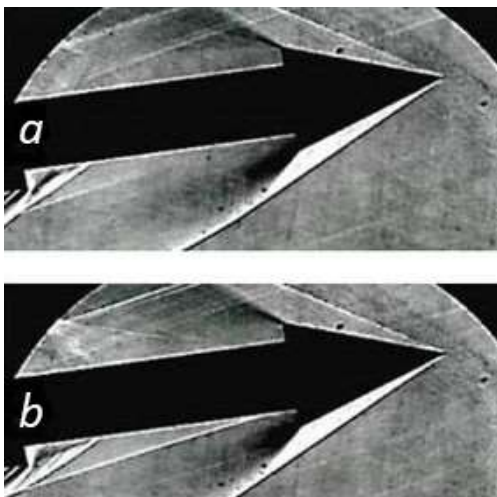
*Research Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russia*

sim1950@mail.ru

Abstract

An overview of the main results of the work carried out at the Moscow State University Research Institute of Mechanics over the past 10 years in the field of studying supersonic flow around annular cavities on conically pointed cylindrical bodies, including at angles of attack, is given. The possibilities of some active and passive methods for controlling the flow modes of the cavity are also presented.

Keywords: angle of attack, hysteresis, flow separation, passive control, active control.



Open (a) and closed (b) cavities at angle of attack (from the left). The boundaries of the hysteresis region "H", closed "C" and open "O" cavities without (1, 2) and with (3, 4) turbulator (from the right)

УДК 533.6.011

Сверхзвуковое обтекание кольцевой каверны на осесимметричном заостренном теле

М. М. Симоненко

*Научно-исследовательский институт механики
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1
sim1950@mail.ru*

Аннотация

Дан обзор основных результатов работ, выполненных в Научно-исследовательском институте механики МГУ за последние 10 лет в области изучения сверхзвукового обтекания кольцевых каверн на конически заостренных цилиндрических телах, в том числе под углами атаки. Также представлены возможности некоторых активных и пассивных методов управления режимами обтекания каверны.

Ключевые слова: угол атаки, гистерезис, отрыв потока, пассивное управление, активное управление.

1. Введение

Сверхзвуковое обтекание каверн (вырезов, выемок) на поверхности тел встречается во многих аэрокосмических приложениях и представляет интерес как с практической точки зрения, так и с точки зрения фундаментальной аэродинамики. Обширная информация о состоянии экспериментальных и численных исследований в области аэродинамики каверн, включая некоторые методы управления отрывным течением в каверне, представлена в обзоре [1].

Рассматривается сверхзвуковое обтекание кольцевой каверны на осесимметричном конически заостренном цилиндрическом теле. Режим сверхзвукового обтекания каверны зависит от параметров набегающего потока, состояния пограничного слоя на входе в каверну и геометрии каверны. В кавернах прямоугольной конфигурации основным параметром, определяющим режим сверхзвукового обтекания, является относительная протяженность каверны $\lambda = L/h$, где L – длина каверны, h – глубина каверны, рис. 1.

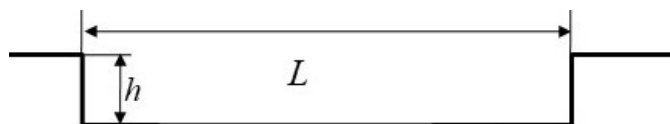


Рис. 1. Схема каверны

В зависимости от отношения длины каверны к ее глубине течение может быть двух видов: с открытым и замкнутым режимами взаимодействия. Когда отношение длины каверны к ее глубине больше некоторого критического значения λ_c ($\lambda > \lambda_c$), реализуется замкнутый режим течения, рис. 2, а. В этом случае внешний сверхзвуковой поток присоединяется к поверхности дна каверны, а около переднего и заднего уступов каверны формируются изолированные области отрыва потока. Если отношение длины каверны к ее глубине меньше соответствующего значения λ_0 ($\lambda < \lambda_0 < \lambda_c$), реализуется открытый режим течения, при этом всю область каверны от передней до задней стенки занимает единое отрывное течение,

отделенное от внешнего потока сдвиговым слоем смешения, рис. 2, б. В определенном интервале соотношений между длиной и глубиной каверны $\lambda_0 < \lambda < \lambda_C$ может устанавливаться как открытый, так и замкнутый режим течения в каверне [2, 3].

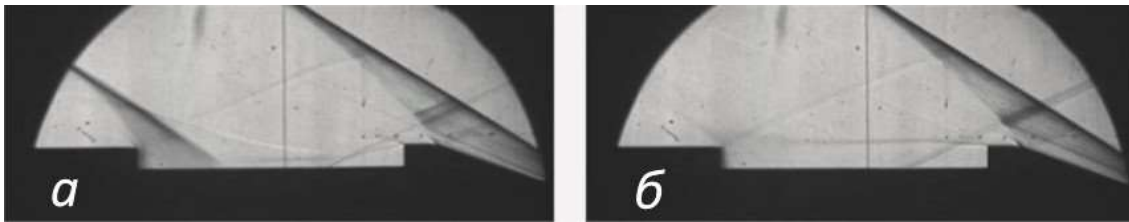


Рис. 2. Визуализация структуры сверхзвукового обтекания модели с кольцевой каверной в области неоднозначности, $M=2.5$, $\lambda=12$: а – замкнутая каверна; б – открытая каверна

Известные экспериментальные и расчетные исследования сверхзвукового обтекания двумерных плоских и осесимметричных каверн посвящены в основном изучению течений открытого типа (относительно короткие каверны) при фиксированной геометрии границ и заданных параметрах внешнего потока. Систематические исследования гистерезисных явлений при сверхзвуковом обтекании кольцевых каверн, в том числе при наличии скоса потока, были начаты относительно недавно в НИИ механики МГУ. С использованием технологии непрерывного изменения протяженности каверны в потоке получены данные о границах области неоднозначных режимов обтекания кольцевой каверны на конически заостренном теле для различных условий формирования потока на входе в каверну, определяемых, в частности, геометрией головного наконечника. Режим течения в области неоднозначности зависит от предыстории обтекания, т.е. имеет место гистерезис [4].

Под углом атаки при сверхзвуковом обтекании каверны возникают более сложные трехмерные структуры течения, рис. 3. При непрерывном изменении угла атаки α были обнаружены обратимые и необратимые переключения режимов обтекания кольцевой каверны [2, 3]. В области неоднозначности первоначально замкнутая при $\alpha = 0^\circ$ каверна необратимо открывалась при увеличении угла атаки и далее оставалась открытой при любых последующих изменениях угла атаки и возврате в исходное положение.

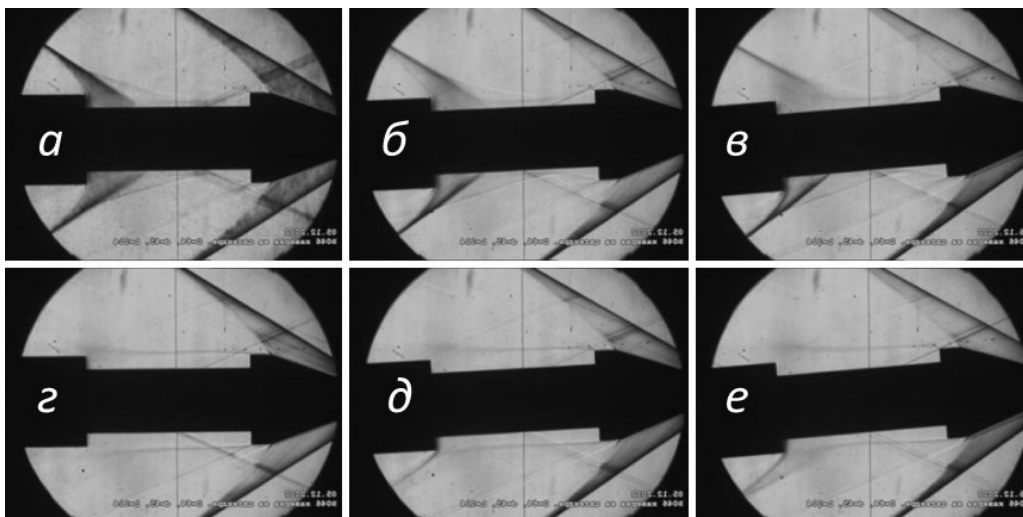


Рис. 3. Визуализация структуры обтекания модели с кольцевой каверной при изменении угла атаки, $M=2.5$, $\lambda=12$: а, б, в – замкнутая каверна; г, д, е – открытая каверна; (а, г) – $\alpha = 0^\circ$; (б, д) – $\alpha = 2^\circ$; (в, е) – $\alpha = 3.8^\circ$

Обнаруженные эффекты послужили основанием для более детального изучения сверхзвукового отрывного обтекания кольцевых каверн.

Важной задачей является поиск способов управления режимами течения в каверне, в том числе, способов переключения режимов обтекания каверны в области неоднозначности. С практической точки зрения открытый режим сверхзвукового обтекания каверны предпочтителен. Замкнутый режим обтекания характеризуется наличием ударно-волновых структур в полости каверны и во внешнем потоке, а также высокоградиентным распределением давления вдоль каверны.

Целью проведенных исследований являлось выявление закономерностей трехмерного обтекания тел с кольцевыми кавернами на поверхности на режимах возможного гистерезиса схем обтекания, на основе изучения влияния изменений физических и геометрических параметров с акцентом на определение способов управления режимами течения.

В данной статье дан обзор основных результатов, полученных при проведении экспериментальных и численных исследований сверхзвукового обтекания кольцевой каверны на конически заостренных цилиндрических телах, включая оценку возможностей пассивных и активных способов управления режимами течения, в том числе, при наличии скоса набегающего потока [2–18]. Исследования проведены в период 2015–2024 г.г. в рамках выполнения работ по госбюджетным темам НИИ механики МГУ при поддержке грантов РФФИ 15-01-99623 и 19-01-00242.

2. Модели и методы исследований

При проведении физических экспериментов использовались аэродинамические установки НИИ механики МГУ с соответствующим штатным приборным и дополнительным обеспечением (www.imes.msu.ru). Эксперименты выполнены в аэродинамической трубе А-7 при числе Маха $M = 3$. Рабочая среда – воздух с температурой торможения $270 \div 275$ К. Единичное число Рейнольдса $Re_1 = 3.6 \div 3.8 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Базовая экспериментальная модель представляла собой осесимметричное ступенчатое цилиндрическое тело со сменными коническими наконечниками, рис. 4. Схема экспериментальной модели показана на рис. 5, а.



Рис. 4. Экспериментальная модель со сменными наконечниками

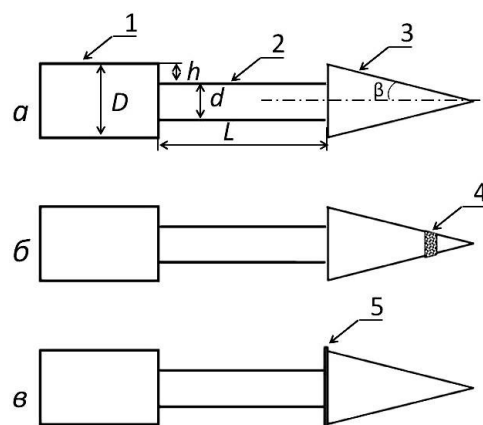


Рис. 5. Схема экспериментальной модели (а) и схемы размещения турбулизаторов Т1 (б) и Т2 (в): 1 – корпус; 2 – выдвижной стержень; 3 – сменный конический наконечник; 4 – Т1; 5 – Т2

Модель содержит цилиндрический корпус 1, выдвижной цилиндрический стержень 2, установленный на стержне 2 сменный конический наконечник 3. Область между корпусом 1 и конусом 3 образует осесимметричную кольцевую каверну с равновеликими высотами переднего и заднего уступов. Дном каверны служит соответствующий участок поверхности стержня 2. В ходе эксперимента длина каверны может непрерывно изменяться, как в сторону

уменьшения, так и в сторону увеличения, за счет встроенного в корпус 1 механизма продольного перемещения стержня 2. На представленной схеме обозначено: D – диаметр корпуса 1; d – диаметр выдвижного стержня 2; β – угол полураствора конического наконечника 3; $h = (D - d)/2$ – глубина каверны; L – длина каверны. Диаметр основания конического наконечника 3 равен диаметру корпуса 1. Геометрические параметры модели: $D = 45$ мм, $d = 29$ мм, $h = 8$ мм. Угол полураствора конуса $\beta = 10^\circ, 20^\circ$ и 30° . Длина каверны могла изменяться в диапазоне $L = 53 \div 160$ мм ($\lambda = 5.6 \div 20$).

Для устранения неопределенности с положением турбулентного перехода осуществлялась турбулизирующая пограничного слоя на поверхности конуса и формирующегося после отрыва потока слоя смешения. В одном варианте на поверхности конуса была образована кольцевая полоска из наклеенного на поверхность мелкозернистого песка (турбулизатор Т1, рис. 5, б). В другом варианте использовался кольцевой проницаемый сетчатый интерцептор, который монтировался непосредственно за головным конусом и выступал над поверхностью конуса на высоту $0.7 \div 0.8$ мм. Геометрическая проницаемость сетки интерцептора была порядка 50 % (турбулизатор Т2, рис. 5, в).

В дальнейшем для краткости модели именуется как ViT_j , где $i = \beta$ – соответствует углу полураствора конуса; j – типу турбулизатора. Для модели с гладким конусом $j = T0$. Головные части моделей $V20T0$, $V10T1$ и $V30T2$ показаны на фотографиях рис. 6.

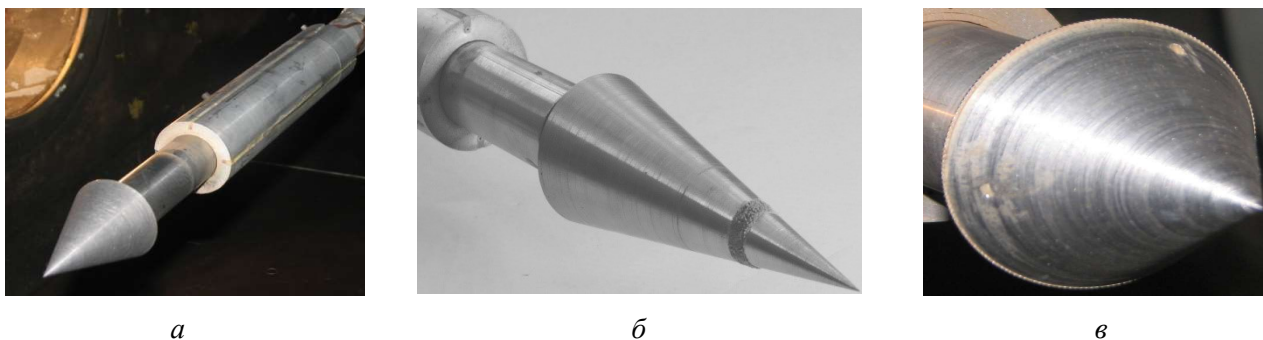


Рис. 6. Экспериментальные модели: а – $V20T0$; б – $V10T1$; в – $V30T2$

Скорость изменения протяженности каверны в экспериментах достигала 2 мм/с, скорость изменения угла атаки – 0.5 град/с. Текущий режим обтекания и текущая протяженность каверны определялись по данным видеорегистрации шлирен-изображений картины течения. В ходе экспериментов осуществлялась регистрация давления на наветренной и подветренной стороне поверхности заднего уступа каверны (переднего торца корпуса 1, рис. 5, а). Дренажные отверстия для приема давления были расположены на расстоянии $h/3$ от дна каверны.

Численные эксперименты проводились в НИИ механики МГУ с использованием программного комплекса FlowVision (<https://flowvision.ru>). Использовались также вычислительные платформы СПбГУ с установленным лицензионным вычислительным кодом ANSYS CFX (<http://cc.spbu.ru>).

3. Осесимметричное обтекание

Модель устанавливалась в рабочей части трубы под нулевым углом атаки при минимальной установившейся протяженности каверны. После запуска аэродинамической трубы и выхода на стационарный режим работы всегда реализовывался открытый режим течения в каверне. При увеличении λ открытая каверна замыкалась при достижении соответствующего значения величины $\lambda = \lambda_c$. После замыкания каверны осуществлялось уменьшение ее протяженности, при этом замкнутая каверна всегда открывалась при достижении соответствующего значения величины $\lambda = \lambda_0 < \lambda_c$. В диапазоне $\lambda_0 < \lambda < \lambda_c$ наблюдалась как открытая, так и замкнутая каверна. Изменение протяженности каверны в диапазоне $\lambda_0 < \lambda < \lambda_c$ как в

сторону увеличения, так и в сторону уменьшения λ , не приводило к изменению ранее установившегося режима обтекания каверны [5, 6].

Представленные на рис. 7 картины визуализации иллюстрируют структуру открытого и замкнутого режимов течения в каверне при обтекании моделей В20Т0 (а–г), В20Т1 (д–з) и В20Т2 (и–м) в окрестности соответствующих границ областей неоднозначности при $\lambda = \lambda_0$ (картины а, в, д, ж, и, л) и $\lambda = \lambda_c$ (картины б, г, е, з, к, м) [7]. В целом структура течения в открытой и замкнутой каверне всех рассмотренных моделей качественно подобна. В случае моделей типа Т1 в поле течения над головным конусом наблюдается скачок уплотнения, возникающий перед песчаной полоской (картины д–з), а в случае моделей типа Т2 скачок уплотнения наблюдается перед сетчатым интерцептором (картины и–м).

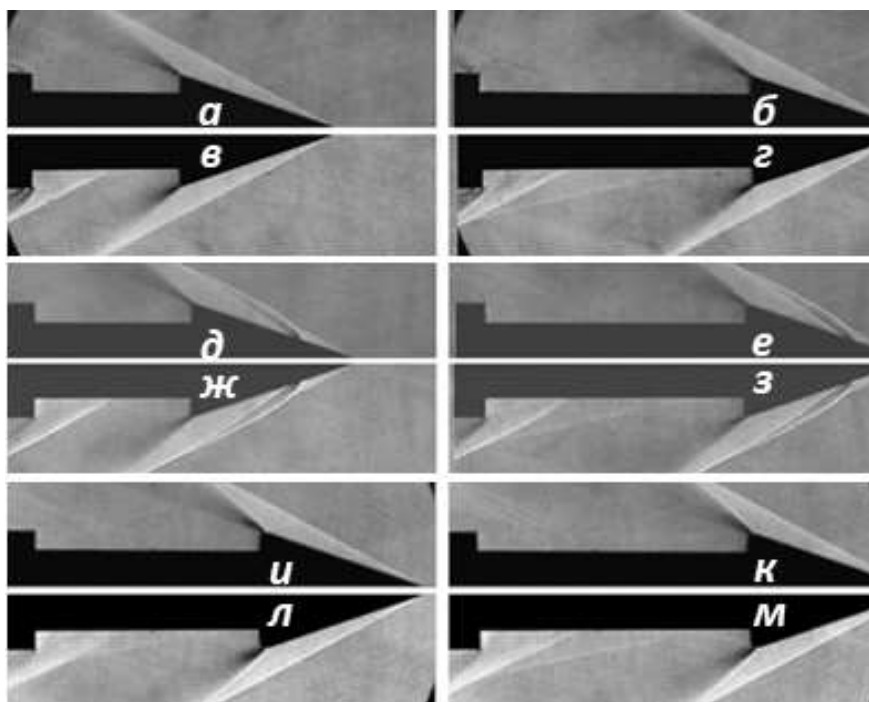


Рис. 7. Визуализация структуры обтекания моделей В20Т0 (а–г), В20Т1 (д–з) и В20Т2 (и–м) на границах областей неоднозначности при $\lambda = \lambda_0$ (а, в, д, ж, и, л) и при $\lambda = \lambda_c$ (б, г, е, з, к, м): а, б, д, е, и, к – открытая каверна; в, г, ж, з, л, м – замкнутая каверна

Турбулизация потока на поверхности головного конуса (турбулизатор типа Т1) практически не влияет на протяженность изолированных областей отрыва в замкнутой каверне и, соответственно, на величину λ_0 , при достижении которой замкнутая каверна открывается в процессе уменьшения ее протяженности. Вместе с тем, для моделей типа Т1 происходит более раннее замыкание каверны. Для моделей типа Т2 на замкнутом режиме обтекания каверны визуально наблюдается более протяженная область отрыва за передним уступом каверны (картины л, м) по сравнению с моделями типа Т0 (картины в, г), что влияет на величину λ_0 .

Индикатором смены режима обтекания каверны при изменении ее протяженности является скачок давления перед задним уступом каверны, рис. 8. Стрелками на рисунке здесь и далее показано направление изменения λ . По мере увеличения λ открытой каверны давление перед задним уступом повышается. В случае моделей, снабженных турбулизатором Т1, при увеличении λ открытой каверны давление перед задним уступом возрастает более интенсивно по сравнению с моделями, снабженными гладким конусом (кривые 1 и 2, рис. 8). Соответственно, критическое давление перед задним уступом, при котором слой смешения замыкается на дно каверны и открытое течение в каверне разрушается, на моделях с турбулизатором Т1 достигается при меньших значениях λ .

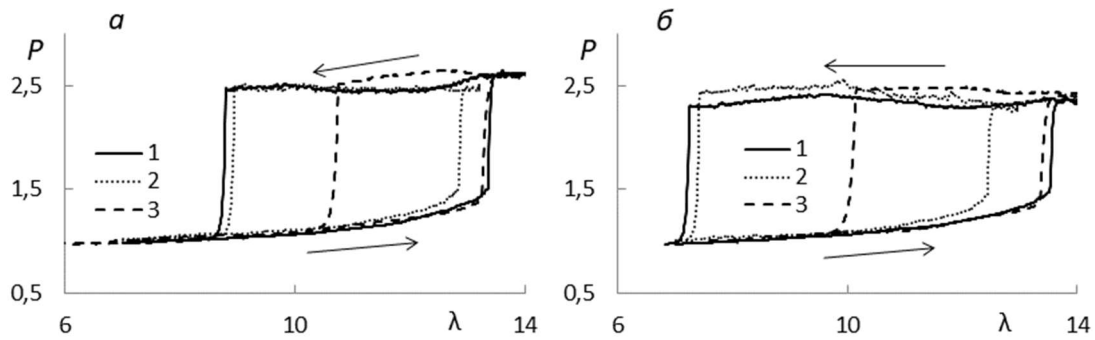


Рис. 8. Изменение относительного давления P на заднем уступе каверны в зависимости от λ при непрерывном изменении протяженности каверны при $\beta = 10^\circ$ (а) и $\beta = 20^\circ$ (б): 1 – Т0; 2 – Т1; 3 – Т2

При уменьшении λ замкнутой каверны давление на заднем уступе остается повышенным вплоть до достижения соответствующего значения $\lambda = \lambda_0$, когда изолированные области отрыва начинают взаимодействовать и образуется единая область отрыва, ограниченная от внешнего потока сдвиговым слоем смешения. При этом давление перед задним уступом резко падает и достигает величины, соответствующей, при том же λ , давлению в открытой каверне (нижняя ветвь кривых на рис. 8).

На рис. 9 экспериментальные данные представлены в виде зависимостей величин λ_C и λ_0 от β . Для моделей одного типа зависимость λ_C от β практически линейная.

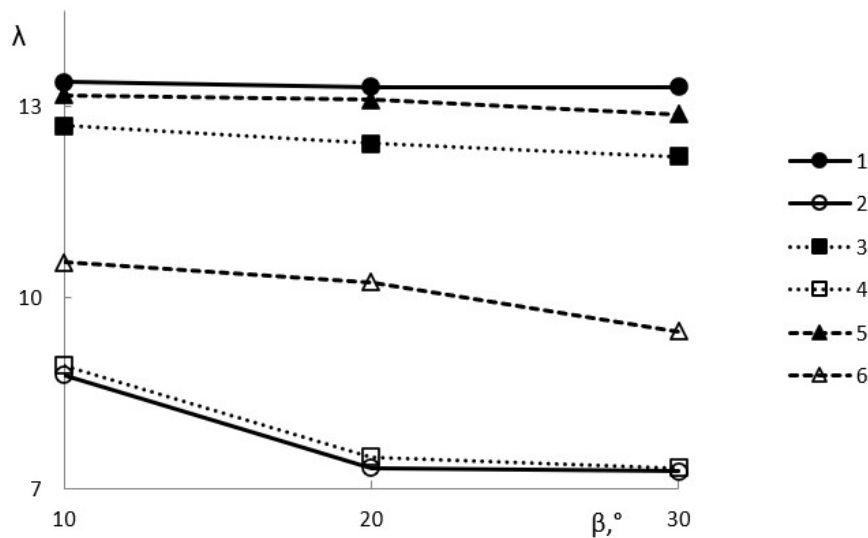


Рис. 9. Влияние угла раствора головного конуса на границы области неоднозначности λ_C (1, 3, 5) и λ_0 (2, 4, 6) при сверхзвуковом обтекании кольцевой каверны: 1, 2 – Т0; 3, 4 – Т1; 5, 6 – Т2

Принудительная турбулизация пограничного слоя на поверхности гладкого конуса (тип Т1) практически не сказывается на значениях величины λ_0 для всех соответствующих значений β (кривые 2, 4 и 6, рис. 9). Вместе с тем, турбулизация пограничного слоя на поверхности головного конуса сопровождалась заметным уменьшением величины λ_C для всех соответствующих значений β (кривые 1, 3 и 5, рис. 9). Турбулизация формирующегося сдвигового слоя смешения посредством пронизаемого кольцевого интерцептора, установленного за передним уступом на входе в кольцевую каверну (турбулизатор Т2), практически не влияет на верхнюю границу λ_C области неоднозначности. Турбулизатор Т2 способствует более раннему открытию каверны. Наблюдается заметное увеличение величины λ_0 , характеризующей нижнюю границу области неоднозначности, и соответствующее существенное сокращение протяженности области неоднозначности.

Увеличение λ_0 на моделях с турбулизатором Т2 связано, прежде всего, с увеличением масштабов области отрыва за передним уступом замкнутой каверны и увеличением протяженности отрывного следа при практически неизменной конфигурации отрыва перед задним уступом каверны. Увеличение масштабов передней отрывной области и следа за ним связано, с одной стороны, с увеличением эффективной высоты ступеньки переднего уступа каверны. С другой стороны, при наличии турбулизатора Т2 увеличивается толщина формирующегося в каверне турбулентного сдвигового слоя смешения. Кроме того, затекание газа в отрывную область за передним уступом через выступающий над поверхностью конуса проникаемый интерцептор способствует повышению донного давления за передним уступом, что также влияет на масштабы области отрыва и протяженности следа за ним.

Численное моделирование сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной при непрерывном изменении длины каверны выполнено с использованием программного комплекса FlowVision [8]. Воспроизведен и исследован наблюдавшийся в эксперименте аэродинамический гистерезис при перестройке схем обтекания кольцевой каверны при непрерывном изменении ее протяженности. Исследовано влияние скорости изменения длины каверны на характер изменения течения. Проиллюстрирован механизм перестройки режимов течения в каверне при непрерывном изменении ее длины. Дана оценка протяженности области гистерезиса при сверхзвуковом обтекании тела с каверной.

4. Обтекание под углом атаки

При наличии скоса потока в каверне возникают более сложные структуры течения [9–11]. В открытой каверне под углом атаки в рассмотренном диапазоне изменения λ структура течения на подветренной стороне сохраняется, в то время как на наветренной стороне возникает структура, схожая со структурой течения замкнутой каверны, рис. 10, *а* и 10, *б*. Признаком открытой каверны под углом атаки является незамкнутая область отрыва за передним уступом каверны. В процессе увеличения λ при достижении соответствующего значения $\lambda = \lambda_c(\alpha)$ область отрыва за передним уступом замыкается, при этом на подветренной стороне формируется структура, характерная для замкнутой каверны, рис. 10, *в*. При последующем уменьшении λ замкнутая каверна сохраняется, пока $\lambda > \lambda_0(\alpha)$, рис. 10, *в*. При достижении соответствующего значения $\lambda = \lambda_0(\alpha)$ каверна открывается, возникает структура, изображенная на рис. 10, *а*.

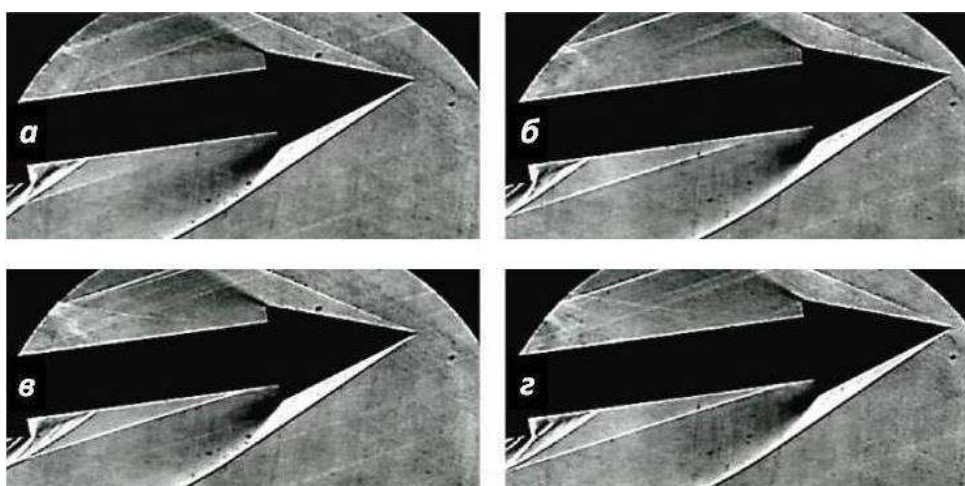


Рис. 10. Визуализация структуры обтекания каверны под углом атаки $\alpha = 9^\circ$, модель В20Т0: *а, б* – открытая каверна; *в, г* – замкнутая каверна; *а, в* – $\lambda = 13.7$; *б, г* – $\lambda = 15.6$

Индикатором смены режима течения при изменении протяженности каверны является скачок давления в точках регистрации на заднем уступе каверны, рис. 11.

При увеличении угла атаки область неоднозначности сокращается. Под углом атаки $\alpha = 11^\circ$ гистерезис уже не наблюдается (замыкание открытой и открытие замкнутой каверны происходит при практически одинаковых значениях λ_C и λ_O , соответственно), изменение давления в точках измерения не зависит от направления изменения протяженности каверны (кривые 4, рис. 11). Результаты измерения давления согласуются с результатами визуализации. Характерной особенностью обтекания после замыкания каверны при углах атаки $\alpha > 6^\circ$ является возрастание давления на подветренной стороне заднего уступа при увеличении λ , рис. 11, б, в то время как давление на наветренной стороне практически не изменяется, рис. 11, а.

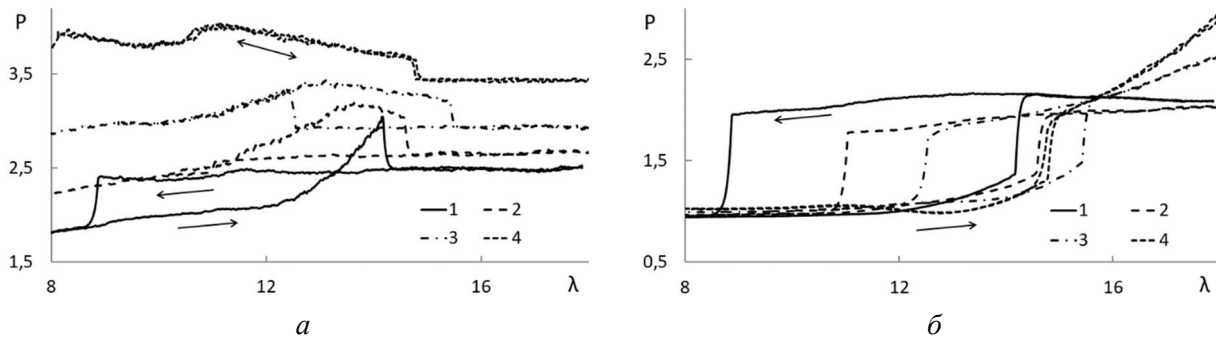


Рис. 11. Изменение относительного давления в точках регистрации на наветренной (а) и подветренной (б) стороне заднего уступа каверны, модель V20T0 под углами атаки: 1 – $\alpha = 4^\circ$; 2 – $\alpha = 6^\circ$; 3 – $\alpha = 8^\circ$ и 4 – $\alpha = 11^\circ$

На моделях типа T2 при изменении λ на углах атаки $\alpha > 6^\circ$ неоднозначные режимы обтекания не наблюдались, рис. 12.

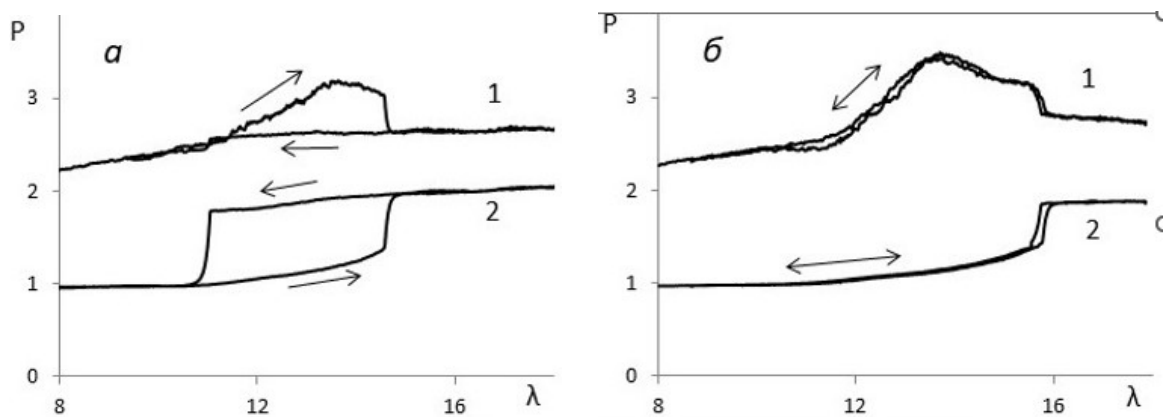


Рис. 12. Изменение относительного давления P в точках регистрации в зависимости от λ на моделях V20T0 (а) и V20T2 (б) под углом атаки $\alpha = 6^\circ$: 1 – наветренная сторона; 2 – подветренная сторона

По результатам визуализации и измерения давления в параметрической плоскости (α, λ) определены границы областей неоднозначности для моделей типа 0 и типа 2. В качестве примера, на рис. 13 и рис. 14 представлены графики зависимостей $\lambda_O(\alpha)$ и $\lambda_C(\alpha)$ для моделей V10T0, V10T2 и моделей V20T0, V20T2, соответственно.

Параметрическая плоскость (α, λ) разделяется кривыми 1(3) и 2(4) на три части:

- «О» – область ниже кривой 1(3);
- «С» – область выше кривой 2(4);
- «Н» – область между кривыми 1(3) и 2(4).

Справедливы следующие утверждения:

- для любой точки в области «О» единственно возможный тип течения – «открытая каверна»;

- для любой точки в области «С» единственно возможный тип – «замкнутая каверна»;
- для любой точки в области «Н» возможны два типа течения – «открытая каверна» и «замкнутая каверна».

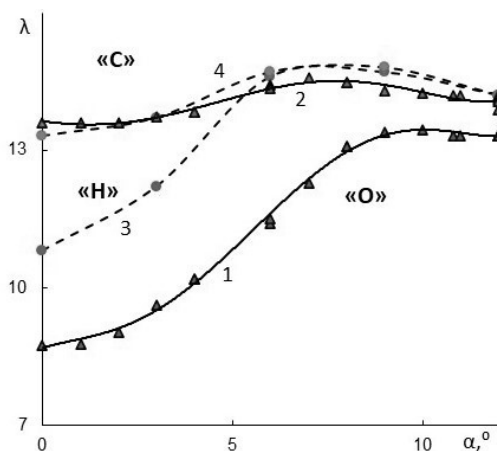


Рис. 13. Границы области неоднозначности моделей V10T0 (1, 2) и V10T2 (3, 4): 1, 3 – λ_0 ; 2, 4 – λ_C

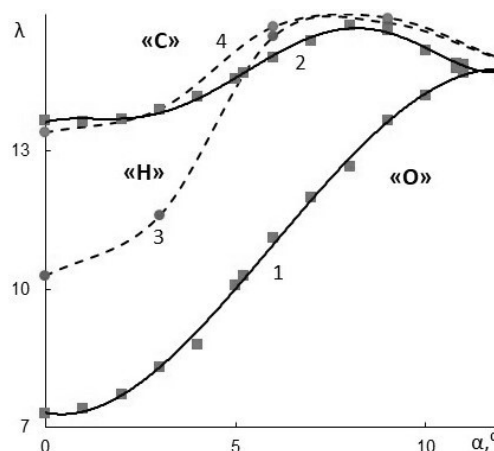


Рис. 14. Границы области неоднозначности моделей V20T0 (1, 2) и V20T2 (3, 4): 1, 3 – λ_0 ; 2, 4 – λ_C

Турбулизация слоя смешения (модели типа T2) приводит к заметному увеличению протяженности области открытых режимов «О» при одновременном сокращении протяженности области неоднозначных режимов «Н» на соответствующих углах атаки. При этом граница замкнутых режимов «С» практически не меняется. При $\alpha > 6^\circ$ у моделей типа T2 область неоднозначности вырождается.

Областям "О" и "С" соответствует однозначная зависимость режима течения от параметров (α, λ) . В противоположность этому, в области "Н" возможны два типа течения при одних и тех же значениях параметров (α, λ) . Конкретный тип течения в области "Н" зависит от предыстории его установления. В этом смысле, область "Н" является областью гистерезиса. Представленная классификация режимов обтекания кольцевой каверны объясняет все наблюдавшиеся в экспериментах режимы развития и перестройки течений при варьировании углов атаки и протяженности кольцевой каверны.

В зависимости от текущей протяженности каверны и ее состояния (открытая или замкнутая каверна) при изменении угла атаки возможны обратимые (гистерезис по углу атаки) и необратимые переключения режимов обтекания каверны. Необратимые переключения режимов обтекания реализуются в случае, когда траектория $\lambda = \text{const}$ пересекает кривую 1 или кривую 2, рис. 15. Обратимые переключения возникают, когда траектория $\lambda = \text{const}$ пересекает обе кривые 1 и 2.

В области «Н» при $\lambda = 8.5$, $\alpha = 0^\circ$ был реализован режим обтекания «замкнутая каверна» (точка А1, рис. 15). Затем происходило непрерывное увеличение угла атаки. Соответствующая траектория в плоскости (α, λ) неизбежно пересекается с границей 1 в точке А2 и переходит из области «Н» в область «О». Каверна открывается в момент достижения $\alpha \approx 3.8^\circ$. Соответствующее изменение давления в точках измерения иллюстрируют графики на рис. 16, а.

Изменение давления в первоначально замкнутой каверне при $\lambda = 14.6$ (точка В1, рис. 15) иллюстрируют графики рис. 16, б. По мере увеличения угла атаки соответствующая траектория пересекает границу 1 в точке В3 и входит в область «О». Первоначально замкнутая каверна открывается при $\alpha \approx 10.8^\circ$. При последующем уменьшении α траектория пересекает верхнюю границу 2 в точке В2 и входит в область замкнутых режимов «С». Открытая каверна замыкается при $\alpha \approx 5^\circ$.

Примеры обратимой и необратимой перестройки структуры течения в кольцевой каверне при изменении угла атаки приведены в работах [9–11].

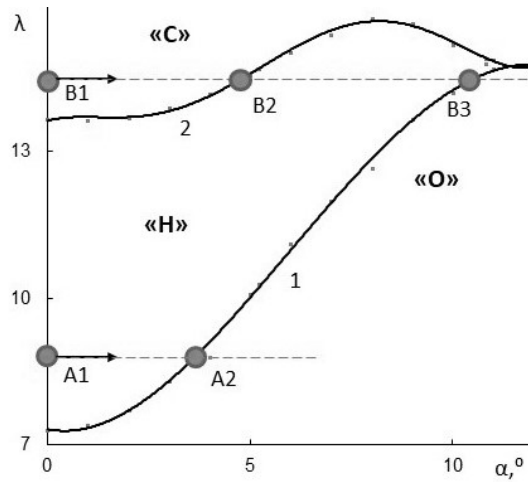


Рис. 15. Схема, иллюстрирующая переключение режимов обтекания кольцевой каверны при изменении угла атаки, модель В20Т0: 1 – $\lambda_C(\alpha)$; 2 – $\lambda_O(\alpha)$; А1, В1 – начальное состояние замкнутой каверны; А2, В2, В3 – точки переключения режимов

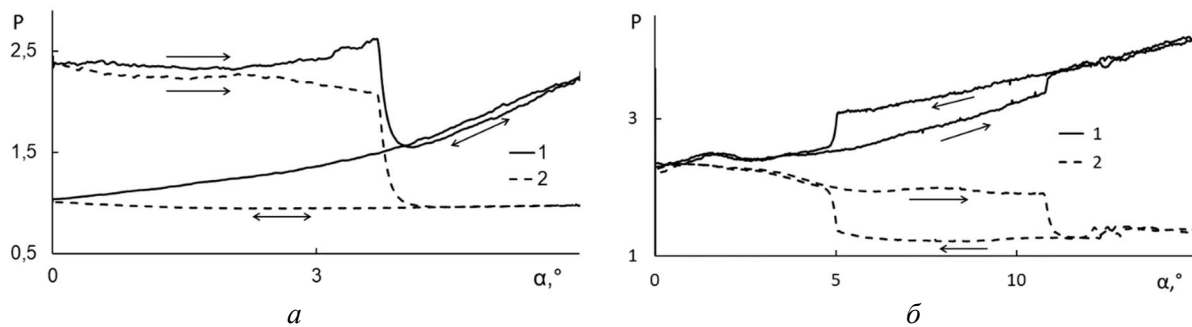


Рис. 16. Изменение относительного давления на заднем уступе первоначально замкнутой при $\alpha = 0^\circ$ каверны при относительной протяженности $\lambda = 8.5$ (а) и $\lambda = 14.6$ (б) в зависимости от угла атаки при непрерывном увеличении и последующем уменьшении угла атаки, $\beta = 20^\circ$: 1 – наветренная сторона; 2 – подветренная сторона

На больших углах атаки при увеличении протяженности замкнутой каверны наблюдалось возрастание давления на подветренной стороне заднего уступа (см. рис. 11, б). Испытания удлиненной замкнутой каверны ($\lambda = 20$) при непрерывном изменении угла атаки показали, что в точках регистрации давление на подветренной стороне заднего уступа каверны может существенно превышать давление на наветренной стороне того же уступа, рис. 17.

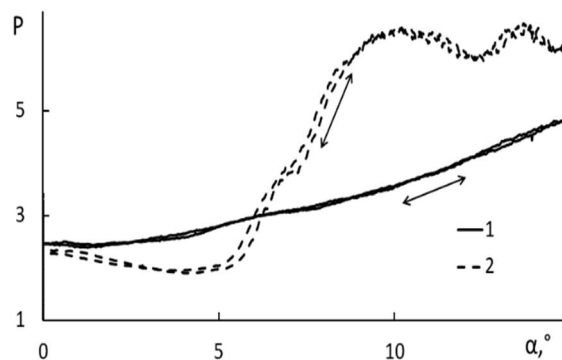


Рис. 17. Изменение относительного давления на заднем уступе каверны при увеличении и уменьшении угла атаки при $\lambda = 20$, модель В10Т0: 1 – наветренная сторона; 2 – подветренная сторона

С целью выяснения причин наблюдаемого аномального поведения давления на подветренной стороне поверхности заднего уступа каверны были проведены экспериментальные [12] и численные [13, 14] исследования обтекания конически заостренного стержня с прямой кольцевой ступенькой.

При экспериментальных исследованиях использовалась модификация модели, изображенной на рис. 4, при этом диаметр основания головного конуса был равен диаметру выдвижного стержня, рис. 18.

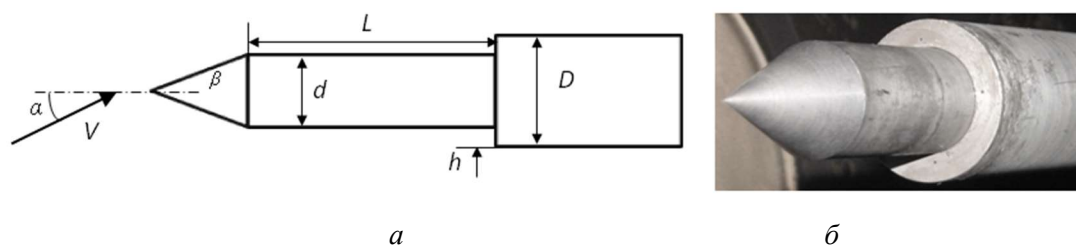


Рис. 18. Схема (а) и фотография (б) модели с кольцевой ступенькой

Структура обтекания модели существенно зависит от удлинения стержня L и угла атаки α , рис. 19 и рис. 20. При увеличении L и α волновая структура на подветренной стороне перед ступенькой размывается, что может свидетельствовать о развитии поперечного отрыва потока на боковой поверхности стержня.

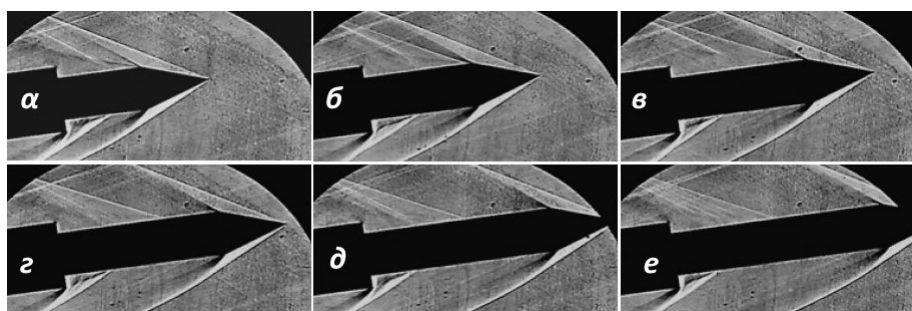


Рис. 19. Визуализация обтекания модели под углом атаки $\alpha = 8^\circ$, $M = 3$:
 а – $L/h = 6.5$; б – $L/h = 8.5$; в – $L/h = 10.5$; г – $L/h = 12.5$; д – $L/h = 14.5$;
 е – $L/h = 16.5$

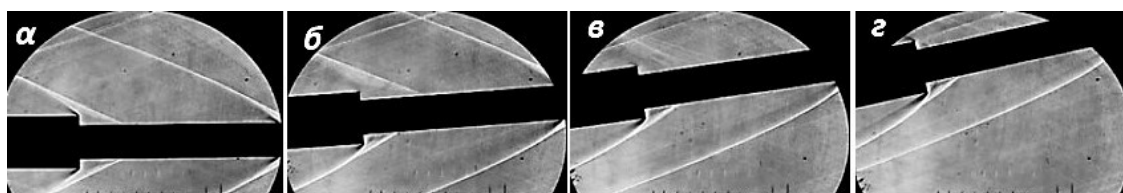


Рис. 20. Визуализация обтекания модели под углами атаки, $L/h = 20$, $M = 3$: а – $\alpha = 0^\circ$;
 б – $\alpha = 4^\circ$; в – $\alpha = 8^\circ$; г – $\alpha = 12^\circ$

Графики на рис. 21 иллюстрируют изменение давления в точках регистрации на наветренной ($\varphi = 0^\circ$) и подветренной ($\varphi = 180^\circ$) стороне поверхности ступеньки на расстоянии $h/3$ от поверхности стержня. Длина стержня L практически не влияет на изменении давления в точках регистрации на наветренной стороне ступеньки. До углов атаки $\alpha < 6^\circ$ давление на подветренной стороне также слабо зависит от L . При более высоких углах атаки наблюдается расслоение кривых изменения давления. При $L > 13$ и $\alpha > 6^\circ$ при увеличении α наблюдается рост давления на подветренной стороне. При $L/h = 20$ и $\alpha > 10^\circ$ давление в точках регистрации на подветренной стороне превышает давление на наветренной стороне.

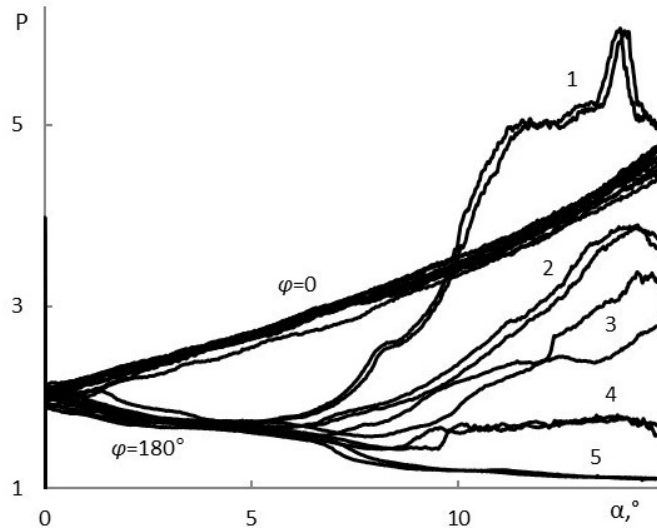


Рис. 21. Изменение давления в точках регистрации на наветренной ($\varphi=0^\circ$) и подветренной ($\varphi=180^\circ$) стороне поверхности ступеньки, $M=3$: 1 – $L/h=20$; 2 – $L/h=17$; 3 – $L/h=15.5$; 4 – $L/h=12.9$; 5 – $L/h=10.5$

Численное моделирование сверхзвукового обтекания кольцевой ступеньки выполнено в пакете ANSYS CFX-15 (URANS, $k-\omega$ SST, $N = 20 \times 10^6$) для условий эксперимента [12]. На рис. 22 показаны схема счетной области и поле чисел Маха в плоскости xy ($z = 0$) для случая $\alpha = 7^\circ$, $L/h = 20$.

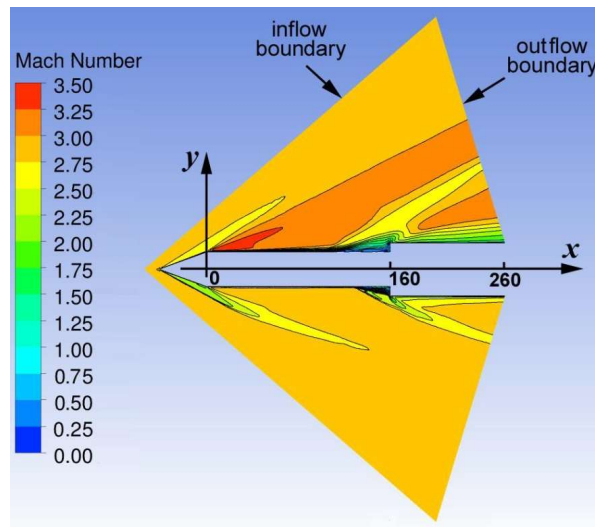


Рис. 22. Схема счетной области и поле чисел Маха

В определенном диапазоне изменения L и α возникает поперечный отрыв, что приводит к формированию на подветренной стороне пары вихрей, рис. 23. Между этими вихрями в пристенной подветренной области развивается узко локализованное сверхзвуковое течение. В результате действия этого механизма происходит локальное повышение давления на подветренной стороне ступеньки (рис. 24) до уровня, характерного для невязкого взаимодействия сверхзвуковой струи с препятствием, рис. 25.

Выполнено также численное моделирование сверхзвукового ($M=3$) обтекания удлиненного гладкого (без ступеньки) цилиндрикоконического осесимметричного тела под углами атаки [15, 16]. На подветренной поверхности тела идентифицированы отрывные структуры, включающие первичный поперечный отрыв набегающего потока и вторичный отрыв расходящегося от плоскости симметрии течения.

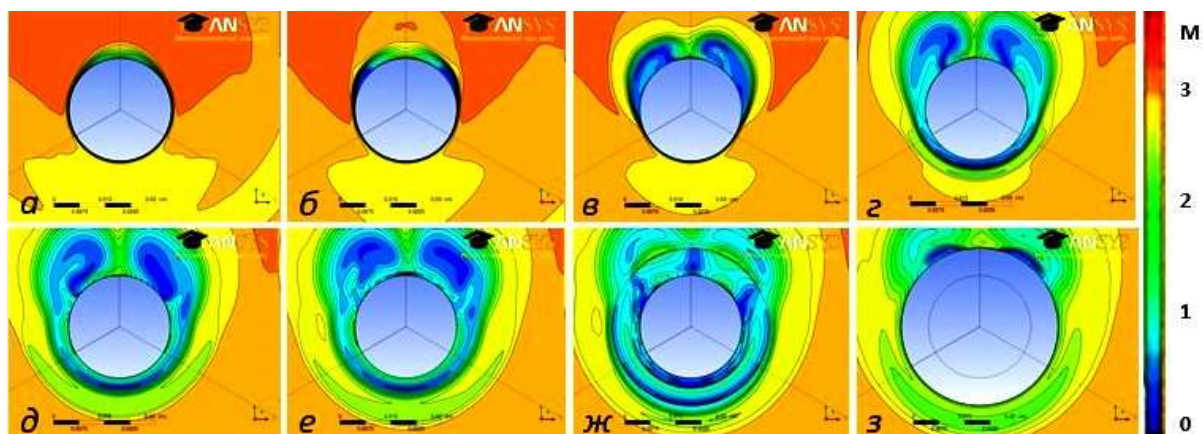


Рис. 23. Поле чисел Маха в плоскости $z=0$, $\alpha=10^\circ$, $L/h=20$: а – $x=70$; б – $x=100$; в – $x=120$; г – $x=140$; д – $x=150$; е – $x=155$; ж – $x=155.9$; з – $x=165$ мм

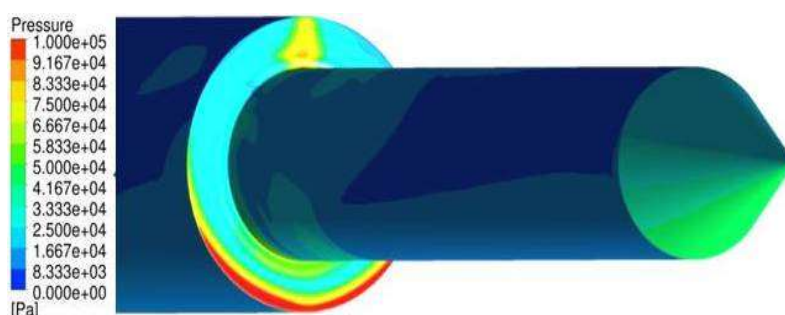


Рис. 24. Распределение давления по поверхности тела со ступенькой при $\alpha=10^\circ$, $L/h=20$

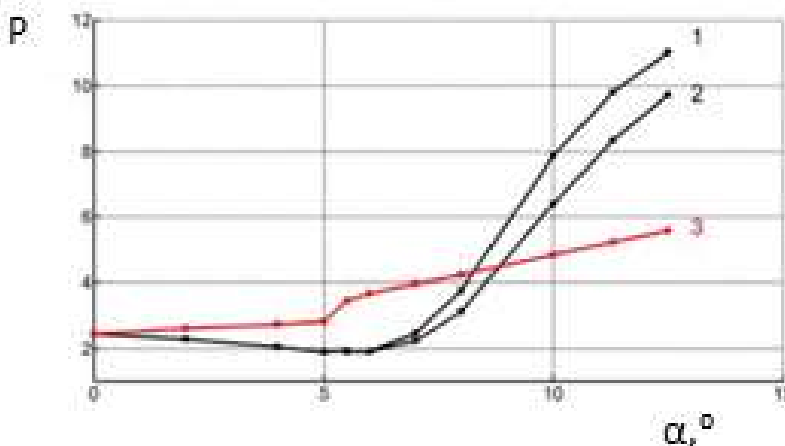


Рис. 25. Изменение давления на поверхности ступеньки, $L/h=20$: 1, 2 – огибающие осциллирующего давления на подветренной стороне; 3 – давление на наветренной стороне

Влияние угла атаки иллюстрируют изолинии $M=2.5$ в подветренном течении в плоскости $z=0$ (рис. 26, а, h – расстояние от поверхности тела в миллиметрах) и области положительных и отрицательных (серый и темный тона, соответственно) значений z -компоненты трения на подветренной поверхности тела (рис. 26, б).

Первичный поперечный отрыв возникает на всех рассмотренных углах атаки $\alpha \geq 5^\circ$. Вторичный отрыв наблюдается при $\alpha \geq 8^\circ$. С увеличением угла атаки интенсифицируется вихревое течение на подветренной стороне, вызывающее отток газа от плоскости симметрии и уменьшение толщины пограничного слоя в окрестности линии растекания. При этом внешний сверхзвуковой поток приближается к обтекаемой поверхности на подветренной стороне,

отрывные структуры и область пристеночного сверхзвукового течения с повышенным полным давлением на подветренной стороне смещаются вверх по потоку.

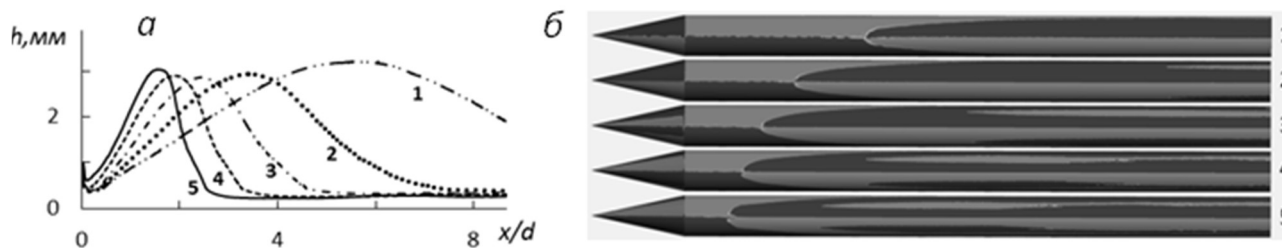


Рис. 26. Изолинии $M=2.5$ в плоскости xy , $z=0$ (а) и области положительных и отрицательных значений z -компоненты трения на подветренной поверхности тела (б): 1 – $\alpha=5^\circ$; 2 – $\alpha=8^\circ$; 3 – $\alpha=11.3^\circ$; 4 – $\alpha=15^\circ$; 5 – $\alpha=18^\circ$

По мере увеличения x эффект инжекции вихревого течения уменьшается, что приводит к вырождению вторичного отрыва. Пристеночное сверхзвуковое течение на подветренной стороне может вызывать аномальное повышение местного давления на выступающих препятствиях.

5. Управление режимами обтекания каверны

Важной задачей является поиск способов управления режимами течения в каверне, в том числе, способов переключения режимов обтекания каверны в области неоднозначности. С практической точки зрения открытый режим сверхзвукового обтекания каверны предпочтителен. Замкнутый режим обтекания характеризуется наличием ударно-волновых структур в полости каверны и во внешнем потоке, а также высокоградиентным распределением давления вдоль каверны.

Были рассмотрены пассивные и активные способы управления режимами обтекания каверны. Пассивные способы включали изменение условий формирования потока на входе в каверну за счет изменения угла раствора головного конуса, применение турбулизаторов, а также поперечных перегородок в каверне.

Влияние угла раствора конуса β и турбулизаторов на границы областей однозначных и неоднозначных режимов осесимметричного обтекания кольцевой каверны иллюстрируют графики рис. 9. В целом, при уменьшении β наблюдается тенденция увеличения λ_0 и λ_C и сокращение протяженности области неоднозначных режимов $\Delta\lambda = \lambda_C - \lambda_0$, рис. 27.

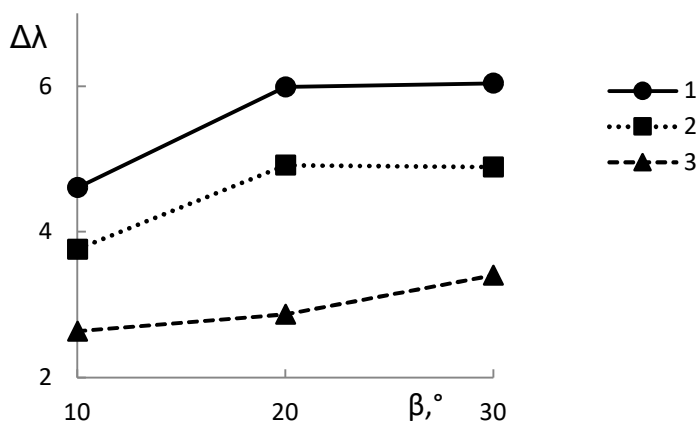


Рис. 27. Влияние угла раствора головного конуса на протяженность области неоднозначности $\Delta\lambda$ при сверхзвуковом обтекании кольцевой каверны: 1 – T0; 2 – T1; 3 – T2

Сокращение протяженности области неоднозначных режимов происходит в основном за счет увеличения λ_0 при несущественном изменении λ_C . Эффективным способом увеличения протяженности области открытых режимов обтекания представляется турбулизация слоя смешения, формирующегося при отрыве потока с кромки переднего уступа каверны. Этот эффект сохраняется также при обтекании каверны под углами атаки (см. рис. 13 и 14).

Изучалась возможность управления режимом обтекания каверны с использованием поперечной перегородки, установленной в полости каверны [17]. В экспериментах применялась модель, изображенная на рис. 4 и 5, *a*, с углом полураствора конуса $\beta = 20^\circ$. На выдвижную штангу на расстоянии L_1 от основания конуса монтировалась шайба диаметром D_1 , рис. 28, *a*. Использовались шайбы диаметром $D_1 = D/2$ и $D_1 = D$, при этом относительная высота перегородки была $h_1 = h/2$ и $h_1 = h$, соответственно. Перегородка устанавливалась на расстоянии $L_1 = 5h$ и $L_1 = 7.5h$ от основания конического наконечника. Фактически, модель представляла собой тандем соосных каверн, при этом первая по потоку каверна имела фиксированную протяженность, а протяженность второй каверны могла непрерывно изменяться.

В первой по потоку каверне всегда реализовывался открытый режим течения. Замыкание (открытие) второй каверны при непрерывном увеличении (уменьшении) ее протяженности характеризуется повышением (уменьшением) давления на заднем уступе. Результаты измерения давления (рис. 28, *б*) и визуализации структуры течения (рис. 28, *в*) свидетельствуют о возможности управления режимами течения в каверне, включая расширение границ области открытых режимов и сокращение границ области неоднозначных режимов обтекания каверны.

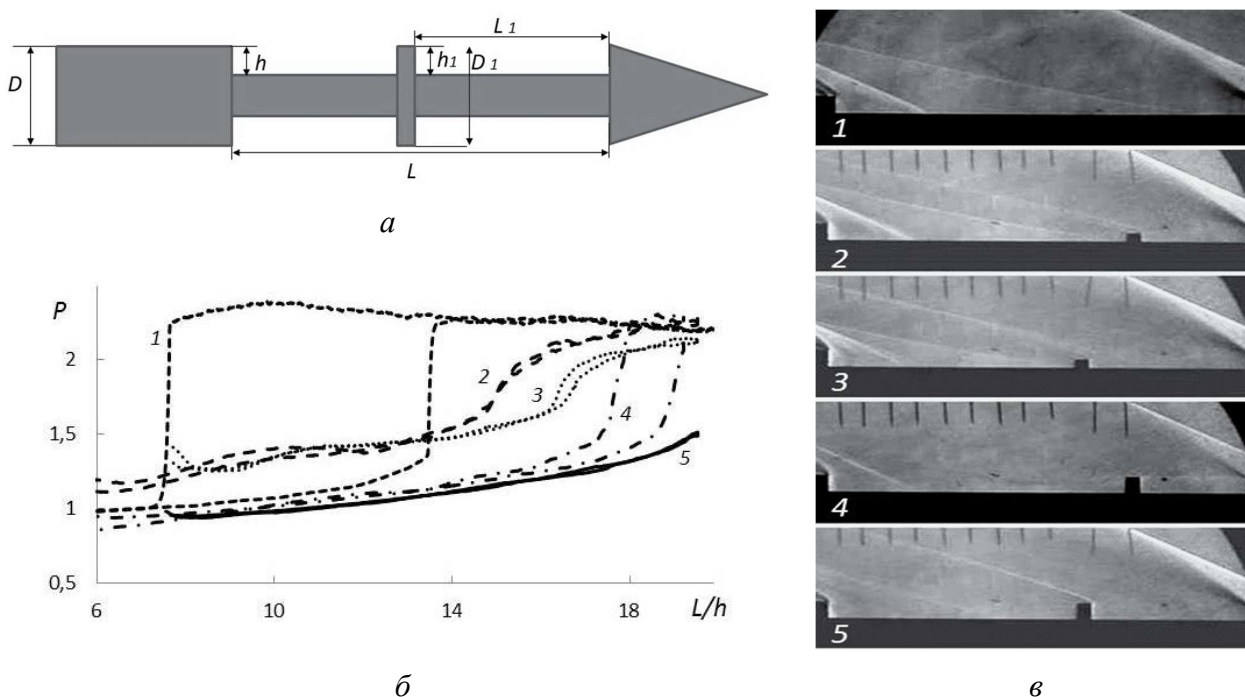


Рис. 28. Схема модели (*a*), изменение давления на заднем уступе (*б*) и визуализация течения при $L/h = 20$ (*в*): 1 – $L_1 = 0$; 2 – $L_1 = 5h$, $h_1 = h/2$; 3 – $L_1 = 7.5h$, $h_1 = h/2$; 4 – $L_1 = 5h$, $h_1 = h$; 5 – $L_1 = 7.5h$, $h_1 = h$

Проведено численное моделирование управления потоком с помощью теплового импульса при сверхзвуковом обтекании осесимметричного тела с каверной в условиях аэродинамического гистерезиса [18]. Подвод энергии осуществлялся в кольцевой области на дне замкнутой каверны, рис. 29. Для рассмотренных режимов и геометрии каверны ($L/h = 10.8$) исследовано влияние положения, мощности и времени действия источника возмущения на перестройку течения. Дана оценка пороговой мощности источника в зависимости от его положения в каверне, рис. 30. При превышении пороговой мощности первоначально замкнутая

каверна открывается. Минимальные затраты энергии ожидаются при размещении источника возмущения в области отрыва потока за передним уступом каверны.

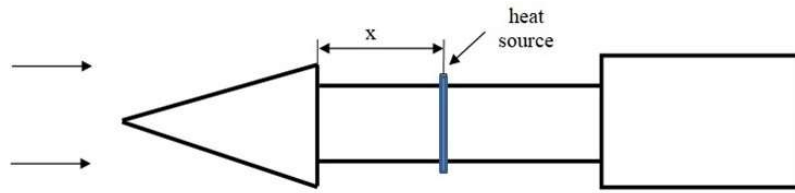


Рис. 29. Схема расположения источника возмущений

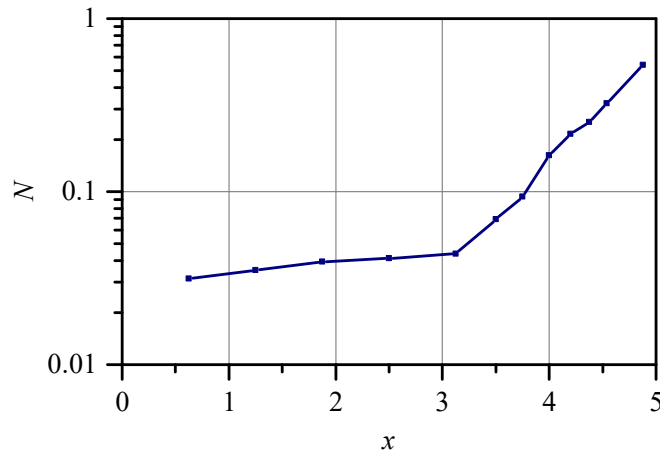


Рис. 30. Пороговая мощность источника N в зависимости от его положения относительно переднего уступа каверны

6. Заключение

При взаимодействии сверхзвукового потока с кольцевыми кавернами возможна двойственность структуры результирующего газодинамического течения, когда при одном и том же наборе значений параметров наблюдаются различные схемы обтекания каверны. При этом характеристики обтекания каверны (такие как конфигурация системы ударных волн, распределение давления и др.) могут зависеть не только от конкретных значений параметров (угла атаки, протяженности каверны, числа Маха, и др.), но и от предыстории достижения этих значений. Диапазон параметров задачи, при которых возможна подобная неоднозначность течений есть область параметрического гистерезиса. Следствием такой неоднозначности является гистерезисное поведение зависимости характеристик обтекания тела от геометрических и режимных параметров задачи, в частности, от угла атаки и относительной длины каверны.

В результате выполненного экспериментального исследования определены границы области параметрического гистерезиса по углу атаки и относительной протяженности кольцевой каверны. Хотя данное исследование выполнено при единственном значении числа Маха ($M = 3$), изменение этого параметра также может приводить к проявлениям гистерезиса.

С практической точки зрения параметрический гистерезис интересен тем, что может оказывать значительное влияние на статические и нестационарные аэродинамические характеристики тел, в частности, влиять на устойчивость колебаний тел по углу атаки.

Дано объяснение локального повышения давления на подветренной стороне удлиненной замкнутой каверны под углом атаки. Возникающие под углом атаки поперечные отрывы потока инициируют формирование глобальных и локальных вихревых структур в подветренном течении. Между этими вихрями развивается узко локализованное сверхзвуковое течение, которое может вызывать локальное повышение давления на выступающих препятствиях до уровня, характерного для невязкого взаимодействия сверхзвуковой струи с препятствием.

Рассмотрены также различные варианты пассивных и активных методов управления режимами обтекания каверны. Полученные данные могут найти применение при разработке систем управления потоком в кавернах на внешней поверхности тел и в каналах.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена в рамках проекта АААА-А16-116021110201-2.

Литература

1. Lawson S.J., Barakos G.N. Review of numerical simulations for high-speed, turbulent cavity flows // *Progress in Aerospace Sciences*. 2011. Vol. 47. No. 3. Pp. 186–216. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.11.002>
2. Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Симоненко М.М., Швец А.И. Экспериментальное исследование трехмерного сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной // *Изв. РАН. МЖГ*. 2014. № 4. С. 136–142. <https://doi.org/10.1134/S0015462814040140>
3. Гувернюк С. В., Зубков А. Ф., Симоненко М. М. О сверхзвуковом обтекании кольцевых каверн под углом атаки // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2018. Т. 19, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-1/articles/734/>
4. 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. Сборник докладов Международной конференции, приуроченной к 75-летию академика В.А. Левина. ООО "Мегапринт". Иркутск*. 2014. С. 163–168.
5. Гувернюк С. В., Зубков А. Ф., Симоненко М. М. Экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания осесимметричной кольцевой каверны // *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89. № 3. С. 670–679. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1426-4>
6. Guvernyuk S., Simonenko M., Zubkov A. Hysteresis supersonic flow around circular cavities // *Visualization of Mechanical Processes*. 2017. Vol. 7, no. 2. Pp. 1–8. <http://doi.org/10.1615/VisMechProc.2017016256>.
7. Симоненко М. М., Зубков А. Ф. Пассивное управление потоком в сверхзвуковой кольцевой каверне // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2024. Т. 25, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-3/articles/1027/>
8. Шишаева А. С., Симоненко М. М., Гувернюк С. В., Аксенов А. А. Численное моделирование аэродинамического гистерезиса при сверхзвуковом обтекании осесимметричного тела с каверной в программном комплексе FlowVision // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2017. Т. 18. № 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-1/articles/696/>
9. Guvernyuk S., Simonenko M., Zubkov A. Experimental study of supersonic flow around an axisymmetric annular cavity at angles of attack // *Acta Astronautica*. 2021. Vol. 180. Pp. 693–700. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.013>
10. Симоненко М. М., Зубков А. Ф. Режимы сверхзвукового обтекания кольцевых каверн под углами атаки // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2023. Т. 24. № 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-3/articles/1046/>
11. Simonenko M. M., Guvernyuk S. V., Zubkov A. F. Hysteresis properties of supersonic flow past an annular cavity at angles of attack // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2549, No. 1. P. 070004. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0107904>
12. Симоненко М. М., Зубков А. Ф. Экспериментальное исследование сверхзвукового трехмерного обтекания осесимметричного тела с кольцевым выступом на поверхности // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 5 (698). С. 52–59. <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-5-52-59>

13. Simonenko M. M., Zubkov A. F., Kuzmin A. G. On the supersonic three-dimensional flow over an axisymmetric body with a forward-facing annular step // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1959, no. 050031. Pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5034659>
14. Simonenko M. M., Guvernyuk S. V., Kuzmin A. G. On the supersonic flow over an axisymmetric step at an angle of attack // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2027, no. 030023. Pp. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5065117>
15. Гувернюк С. В., Кузьмин А. Г., Симоненко М. М. Структура и перестройка вихревых течений на подветренной стороне осесимметричного тела при сверхзвуковом обтекании под углами атаки // Известия РАН. МЖГ. 2020. Т. 55, № 5. С. 79–82. <http://dx.doi.org/10.31857/S0568528120050084>
16. Гувернюк С. В., Кузьмин А. Г., Симоненко М. М. Отрывные и вихревые структуры при сверхзвуковом обтекании удлиненного цилиндрикоконического тела под углами атаки // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 4. 48–50. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2068>
17. Симоненко М. М., Гувернюк С. В., Зубков А. Ф. Экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания кольцевой каверны с поперечной перегородкой // Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), 24–31 мая 2018 г., Алушта. Т. 1. Изд-во МАИ Москва: 2018. С. 291–293.
18. Шишаева А. С., Симоненко М. М., Гувернюк С. В., Аксенов А. А. Численное моделирование управления потоком с помощью теплового импульса при сверхзвуковом обтекании осесимметричного тела с каверной в условиях аэродинамического гистерезиса // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т. 20. № 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-3/articles/834>

References

1. Lawson S.J., Barakos G.N., Review of numerical simulations for high-speed, turbulent cavity flows, *Progress in Aerospace Sciences*, 2011, vol. 47, issue 3, pp. 186–216. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.11.002>
2. Guvernyuk S. V., Zubkov A. F., Simonenko M. M., and Shvetz A. I., Experimental investigation of three-dimensional supersonic flow past an axisymmetric body with an annular cavity, *Fluid Dyn.*, 2014, vol. 49, issue 4, pp. 540–546. <https://doi.org/10.1134/S0015462814040140>
3. Guvernyuk S. V., Zubkov A. F., and Simonenko M. M., On Supersonic Flow over Circular Cavities at Angle of Attack, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2018, vol. 19, issue 1 [in Russian]. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.19.1.734>
4. Guvernyuk S. V., Zubkov A. F., and Simonenko M. M., Aerodynamical hysteresis under supersonic flow around the circular cavity at axisymmetric body, *Proc. Int. Conf. Dedicated to 75th Anniversary of V.A. Levin*, Academician, Irkutsk: Megaprint, 2014, pp. 163–168 [in Russian].
5. Guvernyuk S. V., Zubkov A. F., and Simonenko M. M., Experimental Investigation of the Supersonic Flow over an Axisymmetric Annular Cavity, *J. Eng. Phys. and Thermophys.*, 2016, vol. 89, issue 3, pp. 678–687. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1426-4>
6. Guvernyuk S. V., Simonenko M. M., Zubkov A. F., Hysteresis supersonic flow around circular cavities, *Visualization of Mechanical Processes*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 1–8. <http://doi.org/10.1615/VisMechProc.2017016256>
7. Simonenko M. M., Zubkov A. F., Passive Control on Supersonic Annular Cavity Flow, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, issue 3 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-3/articles/1027/>
8. Shishaeva A. S., Simonenko M. M., Guvernyuk S. V., Aksenov A. A., Numerical Simulation of Aerodynamic Hysteresis in Supersonic Flow Over an Axisymmetric Body with Annular Cavity in FlowVision CFD Soft-ware, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2017, vol. 18, issue 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-1/articles/696/>

9. Guvernyuk S. V., Simonenko M. M., Zubkov A. F., Experimental study of supersonic flow around an axisymmetric annular cavity at angles of attack, *Acta Astronautica*, 2021, vol. 180, pp. 693–700. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.013>
10. Simonenko M. M., Zubkov A. F., Supersonic flow modes of annular cavities at angles of attack, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, issue 3 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-3/articles/1046/>
11. Simonenko M. M., Guvernyuk S. V., Zubkov A. F., Hysteresis properties of supersonic flow past an annular cavity at angles of attack, *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2549, no. 1, p. 070004. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0107904>
12. Simonenko M. M., Zubkov A. F., An Experimental Study of Three-Dimensional Supersonic Flow Around an Axisymmetric Body with an Annular Ledge on the Surface, *BMSTU J. Mech. Eng.*, 2018, vol. 5, no. 698, pp. 52–59 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-5-52-59>
13. Simonenko M. M., Zubkov A. F., Kuzmin A. G., On the supersonic three-dimensional flow over an axisymmetric body with a forward-facing annular step, *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1959, no. 050031, pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5034659>
14. Simonenko M. M., Guvernyuk S. V., Kuzmin A. G., On the supersonic flow over an axisymmetric step at an angle of attack, *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2027, no. 030023, pp. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5065117>
15. Guvernyuk S. V., Kuzmin A. G., Simonenko M. M., Development of the Vortex Flow Structure on the Leeward Side of an Axisymmetric Body in Supersonic Free Stream at an Angle of Attack, *Fluid Dyn.*, 2020, vol. 55, issue 5, pp. 653–656. <http://dx.doi.org/10.1134/S0015462820050080>
16. Guvernyuk S. V., Kuzmin A. G., Simonenko M. M., Separation and vortex structures in supersonic flow around slender cylindrical-conical body at angles of attack, *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, vol. 4, pp. 48–50. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2068>
17. Simonenko M. M., Guvernyuk S. V., Zubkov A. F., Experimental study of supersonic flow around an annular cavity with a transverse partition, *Proc. of XII Int. Conf. on Appl. Math. and Mech. in Aer. Ind. (NPNJ'2018)*, 24-31 May, 2018, Alushta. M. MAI, 2018, pp. 291–293 [in Russian].
18. Shishaeva A. S., Simonenko M. M., Guvernyuk S. V., Aksenov A. A., Numerical simulation of flow control by a heat pulse under aerodynamic hysteresis in supersonic flow over an axisymmetric body with annular cavity, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2019, vol. 20, issue 3 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-3/articles/834>

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024 г.