

# Passive Control on Supersonic Annular Cavity Flow

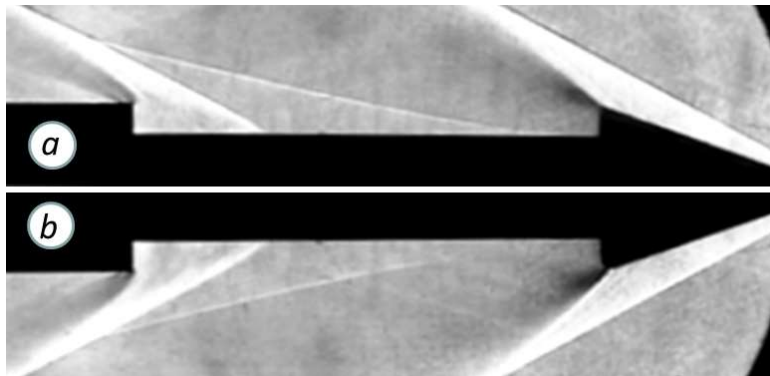
M. M. Simonenko, A. F. Zubkov

*Lomonosov Moscow State University, Research Institute of Mechanics  
Moscow, 119192, Russia  
sim1950@mail.ru*

## Abstract

The mode of supersonic flow around the cavity depends on the parameters of the incoming flow and the geometry of the cavity. In a certain range of ratios between the length and depth of the cavity, both open and closed flow modes in the cavity can be established. An important practical task is to find ways to control the flow regimes in the cavity, in particular, ways to expand the area of favorable open flow regimes. This paper presents the results of an experimental study of supersonic flow around an annular cavity formed by a coaxial conical tip and a cylindrical body connected by a cylindrical rod. A perforated interceptor is used to control the flow mode in the cavity at different angles of the tip cone. With a continuous change in the length of the cavity in the flow, the boundaries of the regions of unambiguous and ambiguous flow regimes in the cavity are determined. The data obtained indicate the possibility of significantly expanding the area of open flow modes in the cavity.

Keywords: annular cavity, permeable interceptor, supersonic flow, flow separation, hysteresis.



Closed cavity flow visualization,  $M=3$ ,  
 $a$  – smooth head cone;  $b$  – permeable annular ledge behind the head cone

УДК 533.6.011

# Пассивное управление потоком в сверхзвуковой кольцевой каверне

М. М. Симоненко, А. Ф. Зубков

*МГУ им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики  
Москва, 119192, Россия  
sim1950@mail.ru*

## Аннотация

Режим сверхзвукового обтекания каверны зависит от параметров набегающего потока и геометрии каверны. В определенном интервале соотношений между длиной и глубиной каверны может устанавливаться как открытый, так и замкнутый режим течения в каверне. Важной практической задачей является поиск способов управления режимами течения в каверне, в частности, способов расширения области благоприятных открытых режимов течения. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования сверхзвукового обтекания кольцевой каверны, образованной соосными коническим наконечником и цилиндрическим телом, соединенных цилиндрическим стержнем. Для управления режимом течения в каверне при разных углах конуса наконечника использован перфорированный интерцептор. При непрерывном изменении протяженности каверны в потоке определены границы областей однозначных и неоднозначных режимов течения в каверне. Полученные данные указывают на возможность значительно расширить область открытых режимов течения в каверне.

Ключевые слова: кольцевая каверна, проницаемый интерцептор, сверхзвуковой поток, отрыв потока, гистерезис.

## 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].

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. В зависимости от отношения длины каверны к ее глубине течение может быть двух видов: с открытым и замкнутым режимами взаимодействия [1–7]. Когда отношение длины каверны к ее глубине больше некоторого критического значения  $\lambda_c$  ( $\lambda > \lambda_c$ ), реализуется замкнутый режим течения. 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  $\lambda_0$  ( $\lambda < \lambda_0 < \lambda_c$ ), 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. 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.

Сверхзвуковое обтекание кольцевых каверн на поверхности конически заостренных тел вращения изучалось экспериментально [3–9] и численно [9–12]. Определенный интерес представляет конфигурация цилиндрикоконического осесимметричного тела с каверной в виде кольцевой прямоугольной выемки, непосредственно примыкающей к головному конусу, как показано на картинах визуализации рис. 1 (по данным работы [7], угол полураствора головного конуса  $\beta = 20^\circ$ ). При одинаковых значениях  $\lambda$  в области неоднозначности  $\lambda_0 < \lambda < \lambda_C$  наблюдаются как открытая (*а*, *б*), так и замкнутая (*в*, *г*) каверна.

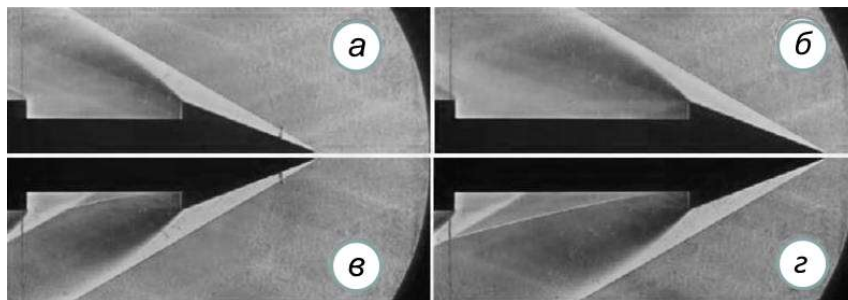


Рис. 1. Визуализация структуры обтекания модели с кольцевой каверной,  $M=3$ : *а*, *б* – открытая каверна; *в*, *г* – замкнутая каверна;  $\lambda=8.8$  (*а*, *в*) и  $\lambda=13.1$  (*б*, *г*)

Для определения границ  $\lambda_0$  и  $\lambda_C$  области неоднозначных режимов обтекания кольцевой каверны использовался метод непрерывного изменения протяженности каверны в потоке [3, 7]. При непрерывном увеличении  $\lambda$  открытая каверна замыкалась при достижении соответствующего значения  $\lambda = \lambda_C$ . При последующем уменьшении  $\lambda$  замкнутая каверна открывалась при достижении соответствующего значения  $\lambda = \lambda_0 < \lambda_C$ . Установлено, что область неоднозначных режимов  $\lambda_0 < \lambda < \lambda_C$  является областью гистерезиса по длине каверны, конкретный режим течения в области неоднозначности зависит от предыстории обтекания каверны.

Несмотря на то, что в многочисленных экспериментальных и численных работах сверхзвуковое обтекание каверн исследовалось в широком диапазоне чисел Маха и Рейнольдса, понимание физики течения в каверне все еще остается неполным. Такие знания важны, в частности, для решения задач управления потоком при использовании каверн.

Важной практической задачей является поиск способов управления режимами течения в каверне, в том числе, способов переключения режимов обтекания каверны в области неоднозначности  $\lambda_0 < \lambda < \lambda_C$ , а также способов расширения протяженности области открытых режимов течения (за счет увеличения  $\lambda_0$ ). С практической точки зрения открытый режим сверхзвукового обтекания каверны более предпочтителен. Замкнутый режим обтекания каверны характеризуется наличием ударно-волновых структур высокой интенсивности в полости каверны и во внешнем потоке, высокоградиентным распределением давления по дну каверны, пониженным давлением в области отрыва за передним (прямым) уступом и повышенным давлением в области отрыва перед задним (обратным) уступом каверны [1–4, 9, 10]. Сопротивление обтекаемого тела с замкнутой каверной может существенно превышать сопротивление аналогичного тела с открытой каверной [5, 10].

Среди известных способов управления течением в каверне, направленных, прежде всего, на снижение и даже исключение эффектов неблагоприятных факторов замкнутого режима течения в каверне, можно отметить активные и пассивные способы, которые основаны на различных вариантах вдува газа в поток, разнообразных модификациях геометрии поверх-

ности переднего и заднего уступов каверны, а также на использовании интерцепторов и перегородок, монтируемых внутри и снаружи полости каверны [1, 13–15]. В области неоднозначности локализованный тепловой импульс относительно небольшой мощности способен вызвать перестройку течения от замкнутого режима к открытому режиму отрывного обтекания каверны [16]. Перестройка замкнутого режима к открытому режиму течения в кольцевой каверне происходила также при изменении угла атаки модели [4–8].

Условия формирования потока на входе в кольцевую каверну влияют на границы области неоднозначности. В частности, при уменьшении угла раствора конического наконечника наблюдалось расширение области существования открытых режимов течения в кольцевой каверне при соответствующем сокращении протяженности области неоднозначных режимов [3]. Принудительная турбулизация сдвигового слоя смещения, формирующегося на входе в каверну при отрыве потока, также приводила к расширению области открытых режимов и сокращению протяженности области неоднозначности [8]. Вместе с тем, в экспериментах [9] не обнаружено влияние принудительной турбулизации слоя смещения на режимы сверхзвукового обтекания кольцевой каверны. В связи с этим представляет интерес более детальное изучение эффектов, связанных с изменением условий формирования потока на входе в кольцевую каверну и влияющих на возможность управления режимами обтекания каверны.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования сверхзвукового обтекания осесимметричной кольцевой каверны, образованной соосными конусом и цилиндром, соединенных цилиндрическим стержнем. Методом непрерывного изменения протяженности каверны в потоке дана оценка границ областей существования однозначных (открытая или замкнутая каверна) и неоднозначных (гистерезис) режимов обтекания каверны при различных условиях формирования потока на входе в каверну. В качестве управляющих факторов рассматривались принудительная турбулизация потока на поверхности головного конуса и принудительная турбулизация сдвигового слоя смещения на входе в каверну при различных углах раствора головного конического наконечника. Исследования проведены при числе Маха  $M = 3$ . Полученные данные могут быть использованы для управления режимами сверхзвукового обтекания каверн в различных технических устройствах.

## 2. Экспериментальная модель и условия испытаний

Типичные конфигурации рассмотренных экспериментальных моделей представляют собой осесимметричные ступенчатые цилиндрические тела со сменными коническими наконечниками, рис. 2. Соответствующая схема экспериментальной модели представлена на рис. 3, а. Экспериментальная модель содержит цилиндрический корпус 1, выдвижной цилиндрический стержень 2, установленный на стержне 2 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 с коническим наконечником 3. На представленной схеме обозначено:  $D$  – диаметр корпуса 1;  $d$  – диаметр выдвижного стержня 2;  $\beta$  – 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  $30^\circ$ . Длина каверны могла изменяться в диапазоне  $L = 53 \div 160$  мм ( $\lambda = 5.6 \div 20$ ).

Эксперименты проведены в аэродинамической трубе А-7 НИИ механики МГУ [17] при числе Маха  $M = 3$ . Рабочая среда – воздух с температурой торможения  $270 \div 275$  К. Единичное число Рейнольдса  $Re_1 = (3.6 \div 3.8) \times 10^7 \text{ м}^{-1}$ . Загромождение моделью рабочей части трубы не превышало 0.5 %.

Для сверхзвуковых аэродинамических труб имеются опытные данные по турбулентному переходу на поверхности острого гладкого конуса [18]. В рассматриваемых условиях сверхзвукового осесимметричного обтекания в соответствии с оценками [3] пограничный слой на поверхности гладкого головного конуса наконечника моделей ламинарный при  $\beta = 30^\circ$ . При  $\beta = 20^\circ$  турбулентный переход возможен на поверхности конуса наконечника непосредственно перед входом в каверну. При  $\beta = 10^\circ$  турбулентный переход происходит в средней части поверхности конуса наконечника.



Рис. 2. Экспериментальная модель со сменными наконечниками

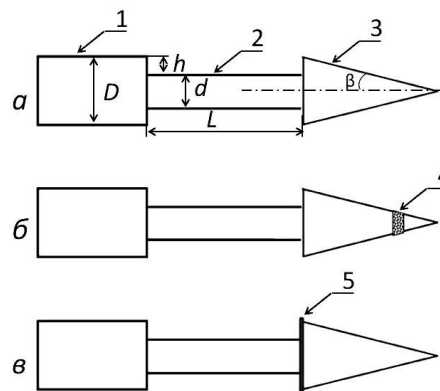


Рис. 3. Схема экспериментальной модели (а) и схемы размещения турбулизаторов Т1 (б) и Т2 (в): 1 – корпус; 2 – выдвижной стержень; 3 – сменный конический наконечник; 4 – Т1; 5 – Т2

Чтобы устранить существующую неопределенность относительно состояния пограничного слоя, была проведена принудительная турбулизация пограничного слоя на поверхности головного конуса. С этой целью на поверхности конуса была образована кольцевая полоска из наклеенного на поверхность мелкозернистого песка (турбулизатор Т1, рис. 3, б). Песчаная кольцевая полоска располагалась на расстоянии  $1/3$  длины конуса от его вершины, где пограничный слой для всех  $\beta$  ожидался заведомо ламинарным. Ширина полоски была порядка  $7 \div 8$  мм.

В другом варианте (турбулизатор Т2, рис. 3, в) осуществлялась принудительная турбулизация сдвигового слоя смешения, формирующегося при отрыве потока на входе в каверну. Для этого использовался кольцевой проницаемый сетчатый интерцептор, который монтировался непосредственно за головным конусом и выступал над поверхностью конуса на высоту порядка  $0.7 \div 0.8$  мм. Геометрическая проницаемость сетки интерцептора составляла 50 %.

Для удобства последующей интерпретации результатов испытаний варианты моделей поименованы как  $V_i T_j$ . Здесь  $V$ ,  $T$  – признаки, характеризующие полуугол раствора конуса  $\beta$  (в градусах) и тип турбулизатора:

- $i$  принимает значения  $i = 10$ ,  $i = 20$  или  $i = 30$  в зависимости от угла полураствора конуса  $\beta = 10^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$  или  $\beta = 30^\circ$ , соответственно;
- $j$  принимает значение  $j = 0$  для модели без турбулизатора;  $j = 1$  – для модели с турбулизатором типа Т1 и  $j = 2$  – для модели с турбулизатором типа Т2, соответственно.

Например, вариант модели при  $\beta = 20^\circ$  без турбулизатора именуется как  $V20T0$ , тип  $T0$ , а аналогичный вариант модели с турбулизатором Т2 –  $V20T2$ , тип  $T2$ . Характеристики всех рассмотренных моделей даны в табл. 1. Головные части 3-х типов экспериментальных моделей показаны на фотографиях рис. 4: тип  $T0$  (а), тип  $T1$  (б) и тип  $T2$  (в).

Для определения границ областей однозначных и неоднозначных режимов обтекания каверны использовалась технология непрерывного изменения протяженности каверны в по-

токе. Скорость изменения протяженности каверны в экспериментах достигала 2 мм/с. Текущий режим обтекания и текущая протяженность каверны определялись по данным видеорегистрации шлирен-изображений картины течения. Для визуализации структуры потока использовался штатный теневой прибор типа ИТ-14.

Таблица 1

## Характеристики экспериментальных моделей

№№ п.п.	Модель	Угол полураствора головного конуса $\beta$ , °	Длина образующей головного конуса $S$ , мм	Турбулизатор	Тип модели
1	V10T0	10	129.6	Отсутствует	T0
2	V20T0	20	65.8	Отсутствует	T0
3	V30T0	30	45.0	Отсутствует	T0
4	V10T1	10	129.6	Песчаная полоска	T1
5	V20T1	20	65.8	Песчаная полоска	T1
6	V30T1	30	45.0	Песчаная полоска	T1
7	V10T2	10	129.6	Проницаемый интерцептор	T2
8	V20T2	20	65.8	Проницаемый интерцептор	T2
9	V30T2	30	45.0	Проницаемый интерцептор	T2

Модель устанавливалась в рабочей части трубы под нулевым углом атаки при минимальной установочной протяженности каверны. После запуска аэродинамической трубы и выхода на стационарный режим работы всегда реализовывался открытый режим течения в каверне. При последующем непрерывном увеличении  $\lambda$  первоначально открытая каверна замыкалась при достижении соответствующего значения величины  $\lambda = \lambda_C$ . После замыкания каверны осуществлялось непрерывное 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  $\lambda$ , не приводило к изменению ранее установившегося режима обтекания каверны.

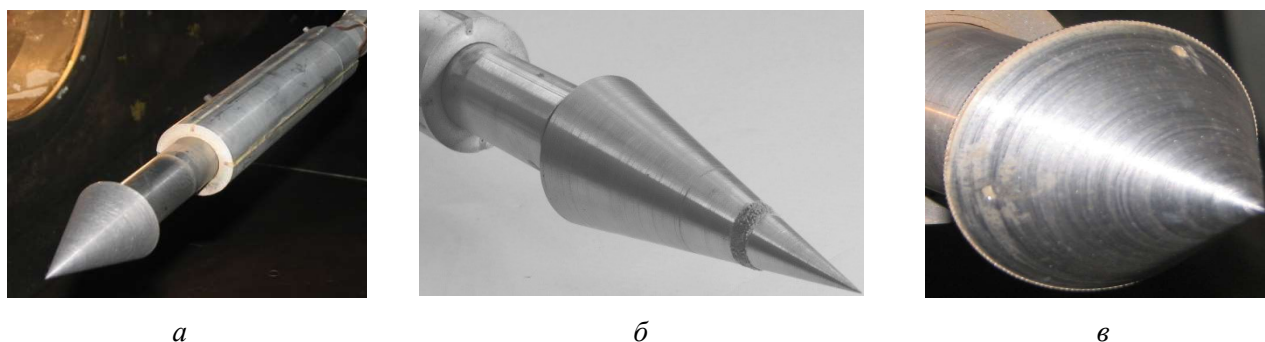


Рис. 4. Экспериментальные модели: а – V20T0; б – V10T1; в – V30T2

В ходе экспериментов осуществлялась также регистрация давления на поверхности заднего уступа каверны (переднего торца корпуса 1, см. рис. 3а). Точки приема давления были расположены на расстоянии  $h/3$  от дна каверны, при этом преобразователи давления нахо-



дилься вне рабочей части аэродинамической трубы и были соединены с приемниками давления гибкими трубками длиной до 3 м. Использовались пьезорезисторные преобразователи давления типа MP3N6115A (Freescale) с диапазоном измерения от 15 до 115 кПа. Погрешность измерений давления не превышала  $\pm 1.5\%$ .

Переключение режимов обтекания каверны при непрерывном изменении ее протяженности сопровождалось скачками давления в точках измерения, что также позволяло идентифицировать текущий (открытый или замкнутый) режим обтекания. Следует отметить, что отклонение от осесимметричности обтекания в диапазоне углов атаки  $\pm 1^\circ$  практически не сказывается на значениях визуально измеренных величин  $\lambda_0$  и  $\lambda_C$  [4, 7, 8].

### 3. Результаты испытаний

Как и в случае моделей с гладким конусом [3], при сверхзвуковом обтекании моделей с турбулизаторами рассмотренных типов в зависимости от протяженности каверны возможны открытый и замкнутый режимы обтекания. Первоначально открытая каверна замыкалась при непрерывном увеличении ее протяженности и достижении соответствующего значения  $\lambda = \lambda_C$ , а замкнутая каверна открывалась при непрерывном уменьшении ее протяженности и достижении соответствующего значения  $\lambda = \lambda_0 < \lambda_C$ . Представленные на рис. 5–7 картины визуализации иллюстрируют структуру открытого и замкнутого режимов течения в каверне при обтекании моделей 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*). В открытой каверне наблюдается сдвиговый слой смешения, отделяющий отрывную область в полости каверны от внешнего сверхзвукового потока. В замкнутой каверне слой смешения присоединяется к дну каверны, за передним уступом образуется замкнутая отрывная область. За первой отрывной областью формируется висячий хвостовой скачок, отчетливо наблюдаемый при больших  $\lambda$ . Перед задним уступом образуется вторая область отрыва, перед которой формируется скачок.

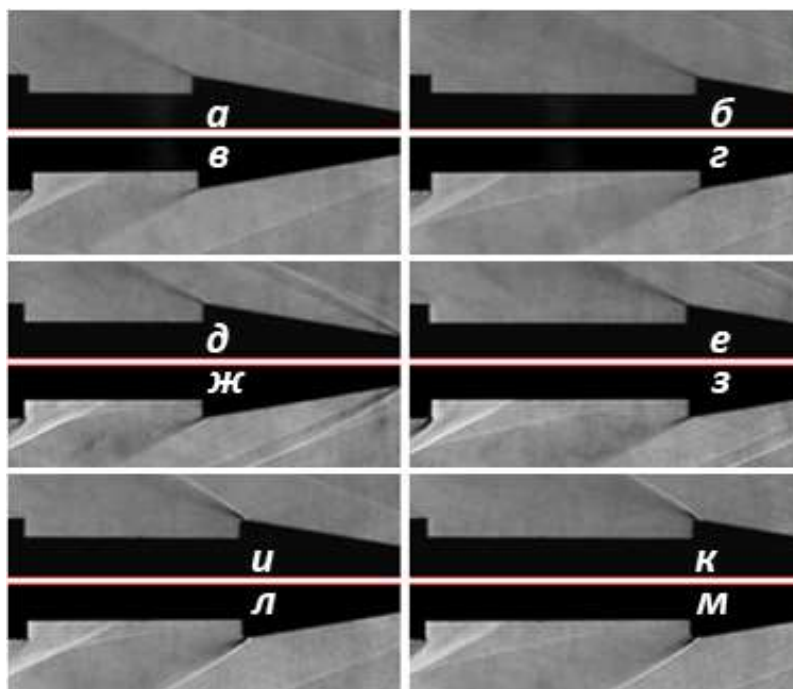


Рис. 5. Визуализация структуры обтекания моделей В10Т0 (*а-г*), В10Т1 (*д-з*) и В10Т2 (*и-м*) на границах областей неоднозначности при  $\lambda = \lambda_0$  (*а, в, д, ж, и, л*) и при  $\lambda = \lambda_C$  (*б, г, е, з, к, м*): *а, б, д, е, и, к* – открытая каверна; *в, г, ж, з, л, м* – замкнутая каверна

В целом структура течения в открытой и замкнутой каверне рассмотренных моделей качественно подобна. При обтекании моделей с турбулизатором типа Т1 в поле течения над головным конусом наблюдается скачок уплотнения, возникающий перед песчаной полоской (картины  $\delta$ – $з$ , рис. 5–7). При обтекании моделей с турбулизатором типа Т2 скачок уплотнения наблюдается перед сетчатым интерцептором (картины  $и$ – $м$ , рис. 5–7).

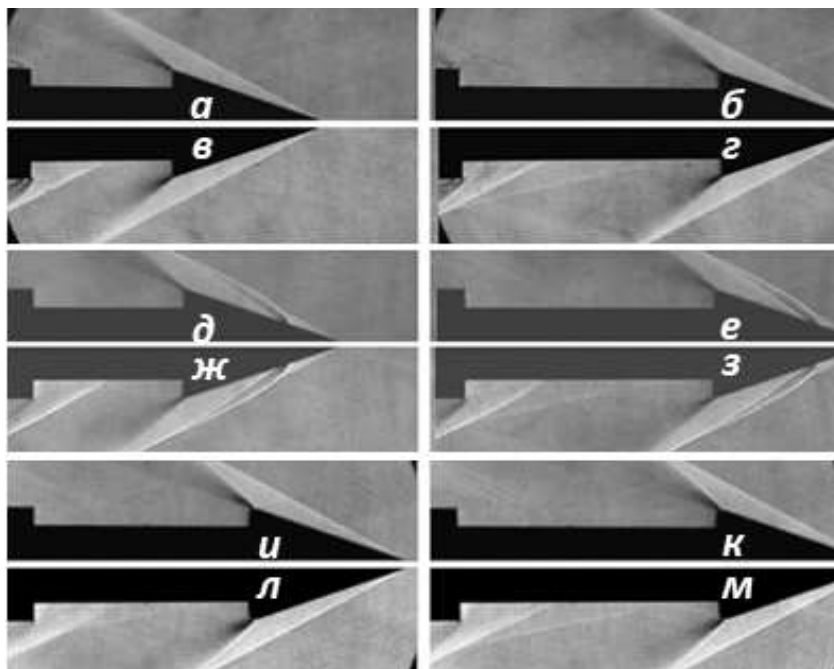


Рис. 6. Визуализация структуры обтекания моделей В20Т0 ( $a$ – $г$ ), В20Т1 ( $\delta$ – $з$ ) и В20Т2 ( $и$ – $м$ ) на границах областей неоднозначности при  $\lambda = \lambda_0$  ( $a$ ,  $в$ ,  $д$ ,  $ж$ ,  $и$ ,  $л$ ) и при  $\lambda = \lambda_c$  ( $б$ ,  $г$ ,  $е$ ,  $з$ ,  $к$ ,  $м$ ):  $a$ ,  $б$ ,  $д$ ,  $е$ ,  $и$ ,  $к$  – открытая каверна;  $в$ ,  $г$ ,  $ж$ ,  $з$ ,  $л$ ,  $м$  – замкнутая каверна

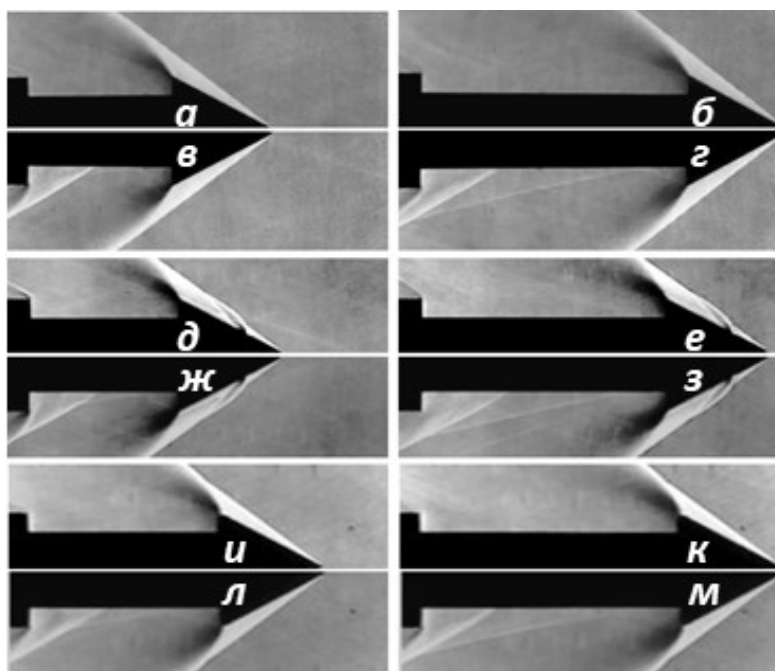


Рис. 7. Визуализация структуры обтекания моделей В30Т0 ( $a$ – $г$ ), В30Т1 ( $\delta$ – $з$ ) и В30Т2 ( $и$ – $м$ ) на границах областей неоднозначности при  $\lambda = \lambda_0$  ( $a$ ,  $в$ ,  $д$ ,  $ж$ ,  $и$ ,  $л$ ) и при  $\lambda = \lambda_c$  ( $б$ ,  $г$ ,  $е$ ,  $з$ ,  $к$ ,  $м$ ):  $a$ ,  $б$ ,  $д$ ,  $е$ ,  $и$ ,  $к$  – открытая каверна;  $в$ ,  $г$ ,  $ж$ ,  $з$ ,  $л$ ,  $м$  – замкнутая каверна



Картины визуализации структуры течения в каверне моделей типа Т0 и типа Т1 идентичны. Турбулизация потока на поверхности головного конуса (турбулизатор типа Т1) практически не влияет на протяженность изолированных областей отрыва в замкнутой каверне и, соответственно, на величину  $\lambda_0$ , при достижении которой замкнутая каверна открывается в процессе уменьшения ее протяженности. Вместе с тем, при наличии турбулизатора Т1 в процессе увеличения протяженности открытой каверны происходит более раннее ее замыкание. В результате сокращается протяженность области неоднозначности  $\Delta\lambda = \lambda_c - \lambda_0$ .

Для моделей с турбулизатором Т2 на замкнутом режиме обтекания каверны визуально наблюдается более протяженная область отрыва за передним уступом каверны (картины л, м, рис. 5–7) по сравнению с моделями без турбулизаторов (картины в, з, рис. 5–7). Турбулизация формирующегося сдвигового слоя смешения сопровождается более заметным увеличением величины  $\lambda_0$  при практически неизменной величине  $\lambda_c$ . При этом протяженность области неоднозначности сокращается более существенно.

Усредненные по ряду опытов значения величин  $\lambda_c$  и  $\lambda_0$  для всех рассмотренных вариантов моделей приведены в табл. 2. Здесь же указана соответствующая протяженность области неоднозначности  $\Delta\lambda = \lambda_c - \lambda_0$ . Для каждой из рассмотренных моделей величина  $\lambda_c$  мало менялась от опыта к опыту, отклонение от среднего значения не превышало 3%. При этом отклонение  $\lambda_0$  от среднего значения достигало 6%. Возможной причиной более существенного разброса  $\lambda_0$  являются интенсивные трехмерные пульсации потока перед задним уступом замкнутой каверны, что приводит к некоторой неопределенности начала взаимодействия отрывных областей и, соответственно, момента открытия замкнутой каверны при непрерывном уменьшении ее протяженности [3].

Таблица 2

Усредненные значения величин  $\lambda_c$ ,  $\lambda_0$  и  $\Delta\lambda$ 

№№ п.п.	Модель	$\lambda_c$	$\lambda_0$	$\Delta\lambda$
1	В10Т0	13.4	8.8	4.6
2	В20Т0	13.3	7.3	6.0
3	В30Т0	13.2	7.2	6.0
4	В10Т1	12.7	8.9	3.8
5	В20Т1	12.4	7.5	4.9
6	В30Т1	12.2	7.3	4.9
7	В10Т2	13.2	10.5	2.7
8	В20Т2	13.1	10.2	2.9
9	В30Т2	12.9	9.5	3.4

При изменении протяженности каверны наблюдаемый режим течения в области  $\lambda_0 < \lambda < \lambda_c$  зависит от того, какой режим течения предшествовал изменению  $\lambda$ . На рис. 8 представлены кривые изменения давления в контрольных точках на поверхности заднего уступа каверны для моделей с углом полураствора конического наконечника  $\beta = 10^\circ$  и  $\beta = 20^\circ$ . Они отражают изменение относительного давления  $P$  в контрольных точках при непрерывном увеличении и уменьшении  $\lambda$ . Стрелки на графиках изменения давления показывают направление изменения варьируемого параметра  $\lambda$ . Нижние ветви кривых соответствуют увеличению, а верхние ветви - уменьшению  $\lambda$ . Давление  $P$  является средним значением величин давления в точках измерения на поверхности заднего уступа и отнесено к статическому давлению  $P_H$  в набегающем потоке.

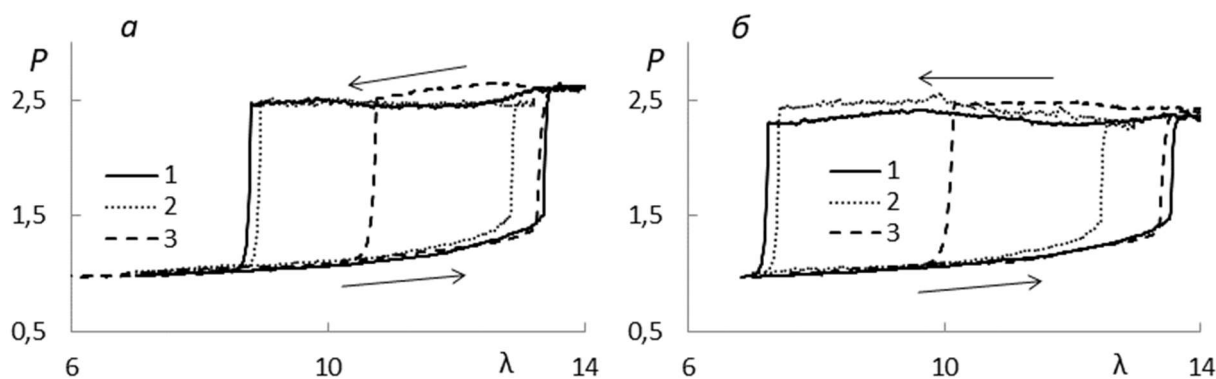


Рис. 8. Изменение относительного давления  $P$  на заднем уступе каверны в зависимости от  $\lambda$  при непрерывном изменении протяженности каверны при  $\beta = 10^\circ$  (а) и  $\beta = 20^\circ$  (б): 1 – Т0; 2 – Т1; 3 – Т2

При увеличении  $\lambda$  первоначально открытой каверны давление  $P$  на заднем уступе монотонно возрастает, что согласуется с результатами визуализации, свидетельствующими о появлении системы волн сжатия в сверхзвуковом потоке над слоем смешения в области перед задним уступом каверны (см. картины *а, б, д, е, и, к* на рис. 5–7). Характер изменения давления на заднем уступе открытой каверны при увеличении  $\lambda$  практически не зависит от конфигурации головного наконечника. Непосредственно перед замыканием каверны давление перед задним уступом открытой каверны достигает некоторого максимального критического значения. Для моделей с гладким конусом и с турбулизатором Т1 критическое давление практически одинаковое и составляет порядка  $1.5 P_n$ . Для модели с турбулизатором Т2 критическое давление несколько меньше, порядка  $1.4 P_n$ . По мере увеличения протяженности открытой каверны давление перед задним уступом возрастает более интенсивно на моделях с турбулизатором Т1, рис. 8. Соответственно, критическое давление перед задним уступом, при котором открытое течение в каверне разрушается, на моделях с турбулизатором Т1 достигается при меньших значениях  $\lambda$ .

При достижении соответствующего значения  $\lambda = \lambda_c$  происходит замыкание каверны, сопровождающееся скачкообразным повышением давления в точках регистрации. После замыкания каверны при дальнейшем увеличении  $\lambda$  повышенное давление перед задним уступом замкнутой каверны сохраняется. При последующем уменьшении  $\lambda$  замкнутой каверны давление на заднем уступе меняется немонотонно, что связано с взаимодействием скачков уплотнения, возникающих за передним уступом и перед задним уступом каверны. Давление остается повышенным вплоть до достижения соответствующего значения  $\lambda = \lambda_0$ . При достижении  $\lambda = \lambda_0$  давление перед задним уступом каверны резко падает и достигает величины, соответствующей (при том же  $\lambda$ ) давлению на нижней ветви кривой, рис. 8. Последующее изменение  $P$  в открытой каверне по мере уменьшения  $\lambda$  происходит вдоль нижних ветвей указанных кривых.

Согласно данным скоростной видеорегистрации [3] перестройка режимов течения в каверне (открытие или замыкание каверны при непрерывном изменении ее протяженности) происходит за короткий промежуток времени, менее  $10^{-3}$  сек. За это время относительная протяженность каверны изменяется на величину менее  $10^{-2}$ . Наблюдаемые на рис. 8 более протяженные интервалы изменения давления при перестройке режимов течения обусловлены демпфированием возмущений в пневмотрассах, соединяющих приемники и преобразователи давления.

#### 4. Обсуждение результатов

В рассмотренном диапазоне изменения углов полураствора головного конуса  $\beta = 10^\circ \div 30^\circ$  для моделей одного типа (без турбулизаторов – тип Т0, с турбулизаторами –

тип Т1 и тип Т2) величины  $\lambda_C$  и  $\lambda_O$  уменьшаются при увеличении  $\beta$ , табл. 2. На рис. 9 экспериментальные данные представлены в виде зависимостей величин  $\lambda_C$  и  $\lambda_O$  от  $\beta$ . Для моделей одного типа зависимость  $\lambda_C$  от  $\beta$  практически линейная, при этом отклонение измеренных величин  $\lambda_C$  от среднего значения не превышает погрешности измерений 2%. Отклонение измеренных величин  $\lambda_O$  от среднего значения для моделей одного типа в диапазоне  $\beta = 10^\circ \div 30^\circ$  более существенное и достигает порядка 20%.

Для моделей с гладким головным конусом более высокое значение величины  $\lambda_O$  при  $\beta = 10^\circ$  связывалось с турбулентным переходом на поверхности более острого конуса и увеличением толщины пограничного слоя на входе в каверну, влияющих на протяженность следа за отрывной областью за передним уступом каверны [3]. Однако, принудительная турбулизирующая пограничного слоя на поверхности гладкого конуса (турбулизатор Т1) практически не сказывалась на значениях величины  $\lambda_O$  для всех соответствующих значений  $\beta$  (кривые 2 и 4, рис. 9). Вместе с тем, турбулизирующая пограничного слоя на поверхности головного конуса сопровождалась заметным уменьшением величины  $\lambda_C$  для всех соответствующих значений  $\beta$  (кривые 1 и 3, рис. 9). Вследствие уменьшения величины  $\lambda_C$  при практически неизменной величине  $\lambda_O$  сокращается протяженность области неоднозначности (кривые 1 и 2, рис. 10).

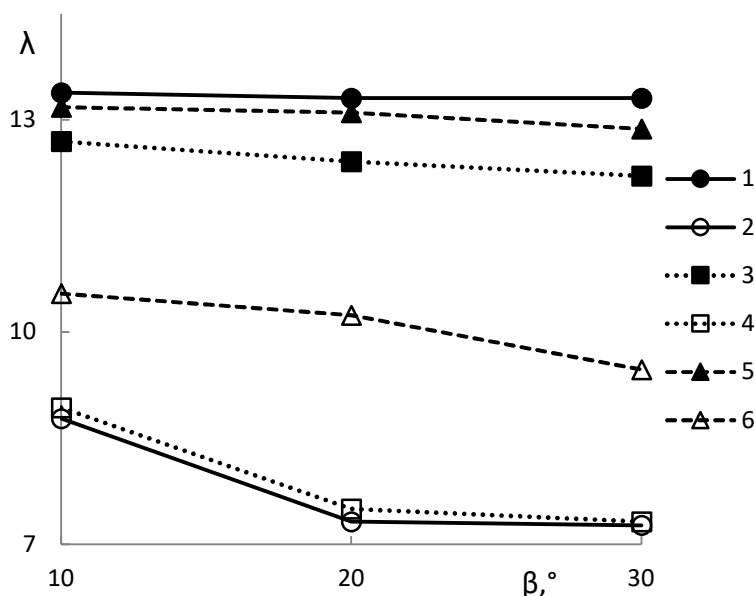


Рис. 9. Влияние угла раствора головного конуса на границы области неоднозначности  $\lambda_C$  (1, 3, 5) и  $\lambda_O$  (2, 4, 6) при сверхзвуковом обтекании кольцевой каверны: 1, 2 – Т0; 3, 4 – Т1; 5, 6 – Т2

Уменьшение  $\lambda_C$  на моделях с турбулизатором Т1 может быть связано с потерями полного давления набегающего потока на скачке, образующемся перед турбулизатором (см. картины  $\delta$ -з, рис. 5–7). Из-за потерь на скачке уменьшаются полное давление и скоростной напор в турбулентном сдвиговом слое смешения, формирующемся после отрыва потока от кромки переднего уступа каверны. В результате снижается эжекционный эффект набегающего потока и, как следствие, присоединение слоя смешения к дну каверны с последующим образованием двух изолированных областей отрыва происходит при меньших значениях  $\lambda$ .

При уменьшении протяженности замкнутая каверна открывается, когда изолированные области отрыва начинают взаимодействовать и возникает возвратное течение из области сжатия перед задним уступом в область разрежения за передним уступом каверны. Результаты визуализации показывают идентичность структуры течения и геометрии областей отрыва в

замкнутой каверне на моделях с гладким конусом и с турбулизатором T1 при всех соответствующих рассмотренных значениях  $\beta$ . Турбулизатор T1 практически не влияет на протяженность изолированных областей отрыва возле уступов каверны и, соответственно, на величину  $\lambda_0$ . На основании этих фактов можно предположить, что турбулентный переход на поверхности головного конуса происходит при всех рассмотренных  $\beta$ .

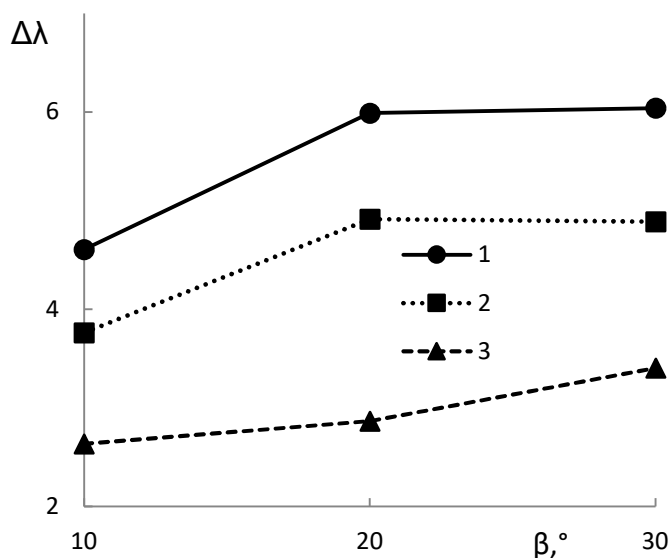


Рис. 10. Влияние угла раствора головного конуса на протяженность области неоднозначности  $\Delta\lambda$  при сверхзвуковом обтекании кольцевой каверны: 1 – T0; 2 – T1; 3 – T2

Согласно данным визуализации, принудительная турбулизация отрывающегося сдвигового слоя смещения (турбулизатор T2) приводила к относительно небольшому, порядка  $2 \div 3$  %, уменьшению величины  $\lambda_C$  (см. кривые 1 и 5, рис. 9). При этом наблюдалось существенное увеличение величины  $\lambda_0$  (см. кривые 2 и 6, рис. 9). Как следствие, происходило более значительное (практически в 2 раза), сокращение протяженности области неоднозначности (см. кривые 1 и 3, рис. 10) в сравнении с моделью с гладким конусом.

В случае моделей с турбулизатором T2 на значение величины  $\lambda_C$  влияет ряд факторов. С одной стороны, при наличии турбулизатора T2 эффективная высота ступеньки переднего уступа увеличивается на  $\sim 10$  %, что должно приводить к замыканию открытой каверны при более высоких значениях  $\lambda_C$ . Согласно имеющимся корреляционным зависимостям [2], прирост величины  $\lambda_C$  может достигать  $4 \div 5$  %. С другой стороны, потери полного давления набегающего потока на скачке, возникающем перед турбулизатором T2 (см. картины и-м, рис. 5–7), приводят к уменьшению полного давления потока в турбулентном сдвиговом слое смещения, что должно способствовать сокращению величины  $\lambda_C$ , как это имело место в случае моделей с турбулизатором T1. Кроме того, к формирующемуся на входе в каверну слою смещения подмешивается поток газа, просачивающегося через проницаемый турбулизатор, что влияет на толщину слоя смещения и его эжекционное свойство. Вследствие разнонаправленного влияния указанных факторов результирующий эффект влияния турбулизатора T2 проявляется в относительно небольшом уменьшении величины  $\lambda_C$ .

Увеличение  $\lambda_0$  на моделях с турбулизатором T2 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. Это иллюстрируют картины визуализации обтекания замкнутой каверны, рис. 11. Увеличение масштабов 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 (по указанным выше причинам). Кроме того, затекание газа в отрывную область за передним уступом через выступающий над поверхностью конуса пронизываемый интерцептор (турбулизатор Т2) способствует повышению донного давления за передним уступом, что также влияет на масштабы области отрыва и протяженности следа за ним.

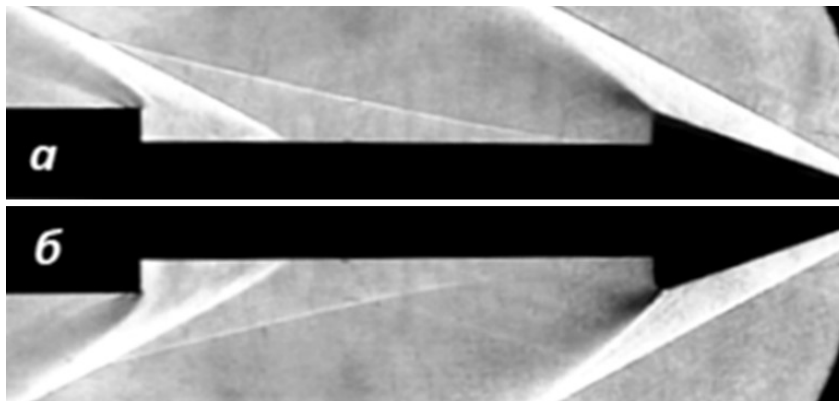


Рис. 11. Визуализация структуры обтекания замкнутой каверны моделей B20T0 (а) и B20T2 (б)

Индикатором смены режима обтекания каверны при изменении ее протяженности является скачок давления перед задним уступом каверны, что иллюстрируют графики изменения давления в точках измерения (см. рис. 8). По мере увеличения протяженности открытой каверны слой смешения прижимается к дну каверны [3], при этом давление перед задним уступом повышается. В случае моделей, снабженных турбулизатором Т1, при увеличении протяженности открытой каверны давление перед задним уступом возрастает более интенсивно по сравнению с моделями, снабженными гладким конусом (см. кривые 1 и 2, рис. 8). Вследствие снижения эжекционного эффекта (при наличии турбулизатора Т1) слой смешения поджимается к дну каверны быстрее. 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  $\lambda$ .

При уменьшении протяженности 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  $\lambda$ , давлению в открытой каверне (нижняя ветвь кривых на рис. 8).

На основании представленных экспериментальных данных визуализации сверхзвукового обтекания рассмотренных моделей с кольцевыми прямоугольными кавернами и измерения давления представляется возможным сделать следующие выводы.

Для моделей одного типа (без турбулизаторов – тип Т0, с турбулизаторами – тип Т1 и тип Т2) при увеличении угла раствора головного конуса величины  $\lambda_c$  и  $\lambda_0$ , определяющие границы области неоднозначных режимов сверхзвукового обтекания каверны, уменьшаются, при этом протяженность области неоднозначности увеличивается.

В рассмотренных условиях принудительная турбулизация потока на поверхности головного конуса (турбулизатор Т1) практически не сказывается на положении нижней границы области неоднозначности  $\lambda_0$ . При непрерывном увеличении протяженности открытой каверны турбулизатор Т1 способствует более раннему замыканию каверны. Наблюдается уменьшение величины  $\lambda_c$ , характеризующей верхнюю границу области гистерезиса, и соответствующее сокращение протяженности области неоднозначности.

Принудительная турбулизация формирующегося сдвигового слоя смешения посредством пронцаемого кольцевого интерцептора, установленного за передним уступом на входе в кольцевую каверну (турбулизатор Т2), практически не влияет на верхнюю границу  $\lambda_C$  области неоднозначности. При непрерывном уменьшении протяженности замкнутой каверны турбулизатор Т2 способствует более раннему открытию каверны. Наблюдается заметное увеличение величины  $\lambda_O$ , характеризующей нижнюю границу области неоднозначности, и соответствующее существенное сокращение протяженности области неоднозначности.

Результаты данного исследования получены при единственном значении числа Маха ( $M=3$ ) и единственной заданной конфигурации пронцаемого кольцевого интерцептора. Эти результаты указывают на то, что использование рассмотренного метода турбулизации слоя смешения может значительно расширить область наиболее благоприятных режимов открытого течения в кольцевой каверне. Очевидно, что конструктивные параметры интерцептора (высота и степень пронцаемости) могут влиять на характеристики и масштабы отрывного следа за передним уступом каверны, определяющих пределы области открытых режимов течения в каверне. Для изучения влияния указанных параметров и оптимизации конструкции целесообразно проведение соответствующего вычислительного эксперимента.

## 5. Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования показана возможность управления режимами сверхзвукового обтекания кольцевой каверны на конически заостренном осесимметричном теле пассивными методами, определяющими структуру и параметры потока на входе в каверну. При различных углах раствора конуса головного наконечника тела рассмотрено влияние на режимы обтекания каверны кольцевых турбулизаторов 2-х типов. Первый тип турбулизатора выполнен в виде кольцевой песчаной полоски, расположенной на поверхности конуса головного наконечника. Второй тип турбулизатора имеет вид кольцевого пронцаемого интерцептора, монтируемого у основания головного конуса непосредственно на входе в каверну.

Установлено, что для моделей одного типа (без турбулизаторов или с турбулизатором) при увеличении угла раствора головного конуса происходит сокращение протяженности области открытых режимов течения в кольцевой каверне, при этом протяженность области неоднозначных режимов возрастает.

В рассмотренных условиях принудительная турбулизация потока на поверхности головного конуса практически не влияет на протяженность области открытых режимов обтекания каверны, при этом протяженность области неоднозначности сокращается.

Применение пронцаемого кольцевого интерцептора на входе каверну приводит к существенному расширению области открытых режимов при практически неизменных границах области замкнутых режимов течения и, как следствие, способствует сокращению области неоднозначности.

Результаты настоящих исследований дополняют полученные ранее [3] данные о гистерезисных свойствах сверхзвуковой кольцевой каверны на заостренном цилиндрикоконическом теле. Полученные данные указывают на возможность управления режимами обтекания кольцевой каверны и значительно расширить область открытых режимов течения в каверне. Результаты работы можно использовать для решения задач управления процессами обтекания каверн на внешней поверхности тел и на внутренней поверхности каналов, в том числе, в практических задачах повышения эффективности смешения сред в сверхзвуковых потоках.

## Благодарности и ссылки на гранты

Авторы выражают благодарность С.Н. Баранникову за помощь при проведении экспериментов.

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 (3). Pp. 186–216. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.11.002>
2. Чжен П. Отрывные течения. Том II. М.: Мир, 1973. 280 с.
3. 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>
4. Guvernuyuk 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>
5. 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>
6. 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/734/3>
7. Симоненко М. М., Зубков А. Ф. Режимы сверхзвукового обтекания кольцевых каверн под углами атаки // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2023. Т. 24, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-3/articles/1046/>
8. Simonenko M. M., Guvernuyuk 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>
9. Mohri K., Hillier R. Computational and experimental study of supersonic flow over axisymmetric cavities // *Shock Waves*. 2011. Vol. 21. Pp. 175–191. <https://doi.org/10.1007/s00193-011-0312-4>
10. 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, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-1/articles/696/>
11. Иванов И. Э., Крюков И. А., Ларина Е. В., Тарасевич А. Г. Численное моделирование обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2015. Т. 16б вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-2/articles/583/>
12. Ivanov I. E., Kryukov I. A., Larina E. V., and Glushko G. S. Turbulent flow over an axisymmetric body with annular cavity // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 815 (012017). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/815/1/012017>
13. Jianbo Zhang, Etsuo Morishita, Takeo Okunuki, and Hiroshi Itoh. Effects of Three Types of Control Devices on Closed-Type Supersonic Cavity Flows // *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.* 2003. Vol. 46. No. 152, pp. 113–120. <https://doi.org/10.2322/tjsass.46.113>.
14. Selin Aradag, Kubra Asena Gelisli, and Elcin Ceren Yaldir. Effects of Active and Passive Control Techniques on Mach 1.5 Cavity Flow Dynamics // *International Journal of Aerospace Engineering*. Volume 2017, Article ID 8253264, 24 p. <https://doi.org/10.1155/2017/8253264>
15. Sinha J., Das S., Kumar P., and Prasad J.K. Computational Investigation of Control Effectiveness on a Near Transition Open and Closed Axisymmetric Cavity // *Advances in Aerospace Science and Applications*. 2014. Vol. 4, no 1, pp. 45–52.
16. 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, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-3/articles/834>

17. Аэродинамические установки Института механики Московского университета. Под ред. Г.Г. Черного, А.И. Зубкова, Ю.А. Панова. М.: Изд-во МГУ. 1985. 44 с.
18. Malik M.R. Prediction and control of transition in supersonic and hypersonic boundary layers. 1989. AIAA Journal. V. 27 (11). Pp. 1487–1493.

## 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, no. 3, pp. 186–216. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.11.002>
2. Chang P. K., *Separation of Flow*, vol. 2, Pergamon, Oxford, 1970.
3. 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, no. 3, pp. 678–687. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1426-4>
4. 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>
5. Guvernyuk S. V., Zubkov A. F., Simonenko M. M., and Shvets A. I., Experimental investigation of three-dimensional supersonic flow past an axisymmetric body with an annular cavity, *Fl. Dyn.*, 2014, vol. 49, no. 4, pp. 540–546. <https://doi.org/10.1134/S0015462814040140>
6. 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, no. 1. [in Russian]. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.19.1.734>
7. 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, no. 3. [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-3/articles/1046/>
8. 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>
9. Mohri K., Hillier R., Computational and experimental study of supersonic flow over axisymmetric cavities, *Shock Waves*, 2011, vol. 21, pp. 175–191. <https://doi.org/10.1007/s00193-011-0312-4>
10. 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, no. 1. [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-1/articles/696/>
11. Ivanov I. E., Kryukov I. A., Larina E. V., Tarasevich A. G., Numerical Simulation of Flow over Axisymmetric Body with Annular Cavity, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2015, vol. 16, no. 2. [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-2/articles/583/>
12. Ivanov I. E., Kryukov I. A., Larina E. V., and Glushko G. S., Turbulent flow over an axisymmetric body with annular cavity, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 815 (012017). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/815/1/012017>
13. Jianbo Zhang, Etsuo Morishita, Takeo Okunuki, and Hiroshi Itoh, Effects of Three Types of Control Devices on Closed-Type Supersonic Cavity Flows, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, 2003, vol. 46, no. 152, pp. 113–120. <https://doi.org/10.2322/tjsass.46.113>
14. Selin Aradag, Kubra Asena Gelisli, and Elcin Ceren Yaldir, Effects of Active and Passive Control Techniques on Mach 1.5 Cavity Flow Dynamics, *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017, Article ID 8253264, 24 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/8253264>

15. Sinha J., Das S., Kumar P., and Prasad J.K., Computational Investigation of Control Effectiveness on a Near Transition Open and Closed Axisymmetric Cavity, *Advances in Aerospace Science and Applications*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 45–52.
16. 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, no. 3. [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-3/articles/834>
17. Chernyi G. G., et al. (Eds.), *Aerodynamic Setups of the Research Institute of Mechanics*, Moscow State University [in Russian], Moscow Univ. Press. Moscow. 1985. <https://www.imec.msu.ru/pages/02/10/10/1374853/>
18. Malik M. R., Prediction and control of transition in supersonic and hypersonic boundary layers, *AIAA Journal*, 1989, vol. 27, no. 11, pp. 1487–1493. <https://doi.org/10.2514/3.10292>

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2024 г.