

Numerical Simulation of Aerodynamic Hysteresis in Supersonic Flow Over an Axisymmetric Body with Annular Cavity in FlowVision CFD Software

A.S. Shishaeva^{1,2}, M.M. Simonenko¹, S.V. Guvernyuk¹, A. A. Aksenov²

¹ *Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russia*

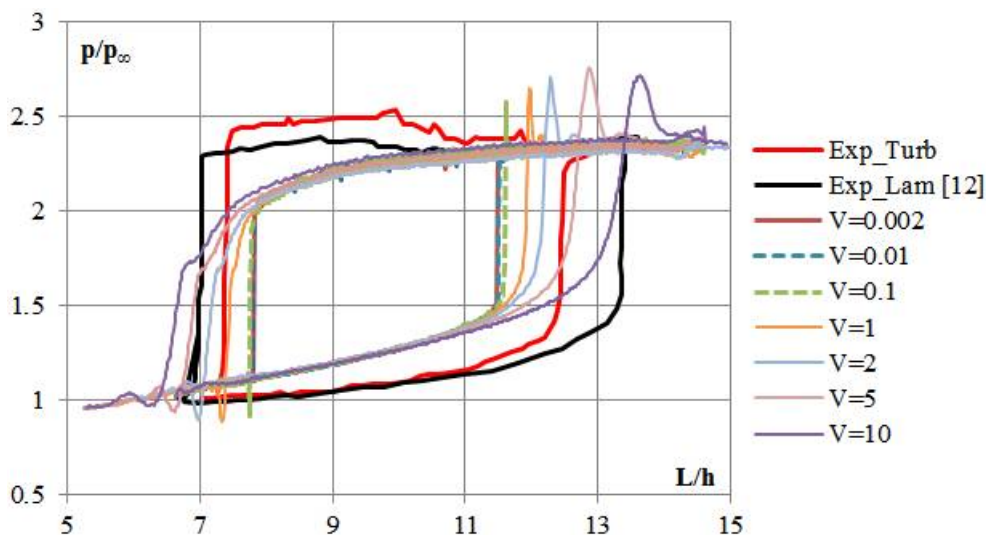
² *Tesis LTD, Moscow, 127083, Russia*

anastasiashishaeva@rambler.ru

Abstract

A numerical simulation of supersonic flow over an axisymmetric cavity under continuously changing of cavity length is presented. The simulation is performed using the FlowVision computational software package. A set of simulations was performed to obtain optimal simulation performance, numerical convergence, optimal turbulence model and its parameters. The comparison of results of numerical simulation and experimental values is performed. The simulations were used for study the effect of dynamic change of cavity on a supersonic flow for different values of process rate. The transformation of flow in a cavity under continuous change of cavity length is modeled. The effect of hysteresis in this process is observed and its parameters are studied.

Keywords: supersonic flow, annular cavity, hysteresis, numerical simulation, FlowVision.



Dynamic of pressure in control point under different speed of rear ledge of the cavity

УДК 533.6.011

Численное моделирование аэродинамического гистерезиса при сверхзвуковом обтекании осесимметричного тела с каверной в программном комплексе FlowVision

А. С. Шишаева^{1,2}, М. М. Симоненко¹, С. В. Гувернюк¹, А. А. Аксенов²

¹ Научно-исследовательский институт механики МГУ,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект, д. 1

² ООО «ТЕСИС», Россия, Москва, 127083, ул. Юннатов, д.18

anastasiashishaeva@rambler.ru

Аннотация

Представлены результаты численного моделирования сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной при непрерывном изменении длины каверны. Численное моделирование выполнено с использованием программного комплекса FlowVision. Проведено исследование сходимости задачи по расчетной сетке, определена оптимальная модель турбулентности. Выполнено сравнение с экспериментом. 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.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, кольцевая каверна, гистерезис, численное моделирование, FlowVision.

1. Введение

Исследование сверхзвукового обтекания тел, содержащих острые кромки и уступы формы поверхности, представляет большой интерес, как с теоретической, так и с практической точки зрения. При сверхзвуковом обтекании тел такого рода появляются локальные области отрыва, которые, в ряде случаев, имеют неоднозначную структуру и возможен аэродинамический гистерезис. В этих случаях картину течения определяют не только физические и геометрические параметры, но и предыстория формирования течения и конфигурации тела, в частности, начальные условия, характер изменения скорости внешнего потока в процессе развития течения, скорость и направление движения элементов конструкции и прочее [1–16]. При одних и тех же геометрических параметрах и граничных условиях, но различных предысториях течения могут реализовываться разные картины течения. Адекватное воспроизведение таких течений представляет собой сложную вычислительную задачу.

Одним из примеров течений с гистерезисом является сверхзвуковое турбулентное обтекание осесимметричного тела с кольцевой каверной. Течения такого рода представляют большой практический интерес, так как реализуются в областях между выступами и около всевозможных выемок и полостей на корпусах летательных аппаратов. В зависимости от отношения длины каверны к ее глубине течение в каверне может быть двух видов: с открытым и замкнутым типами взаимодействия [7–9]. Когда отношение длины каверны к глубине велико, реализуется замкнутое течение. В этом случае внешний сверхзвуковой поток заходит в каверну и присоединяется к поверхности дна каверны. При этом, около переднего и

заднего уступа каверны формируются две изолированные области отрыва потока. Когда соотношение между длиной и глубиной мало, реализуется открытое течение. При этом всю каверну от передней до задней стенки занимает дозвуковое отрывное течение, отделенное от внешнего потока турбулентным слоем смешения. На определенном интервале соотношений между длиной и глубиной каверны в зависимости от предыстории течения может реализовываться как открытый, так и замкнутый режим обтекания каверны. При этом, сопротивление обтекаемого тела с замкнутым режимом течения в каверне может существенно превышать сопротивление аналогичного тела с открытым режимом течения в каверне. Важной практической задачей является поиск способов управления режимами течения в каверне и затягивание перехода от открытой каверны к замкнутой [10].

Область, в которой возможна реализация как открытого, так и замкнутого течения, является областью гистерезиса. На сегодняшний день существует ряд работ, посвященных численному и экспериментальному определению границ области гистерезиса [3–6, 11–12]. Преимущественно, рассматриваются два варианта изменения условий обтекания для получения гистерезиса: непрерывное изменение размеров каверны и изменение угла поворота тела к потоку. Изменение размеров каверны представляет больший интерес с теоретической точки зрения, т.к. позволяет наиболее точно определить интервал длины каверны, на котором возможна реализация гистерезиса. Изменение угла представляет больший практический интерес, т.к. поворот обтекаемого тела часто встречается в реальных условиях. При этом, несмотря на обширный список работ, посвященных данной задаче, на сегодняшний день ряд вопросов, связанных с реализацией гистерезиса, остается открытым. Например, переход от замкнутого течения к открытому обусловлен критическим сближением двух областей отрыва потока, образуемых при замкнутом течении [3–6]. Однако, переход от открытого типа течения к замкнутому до сих пор малоизучен. Экспериментально исследовать собственно процесс перехода затруднительно из-за высокой скорости перестройки потока, а при численном решении задачи трудно моделировать непрерывное изменение протяженности каверны непосредственно в процессе расчета. Также, неисследованным остается вопрос влияния скорости изменения протяженности каверны на границы области гистерезиса.

Другой важной задачей, связанной с управлением течением в кольцевых кавернах, является исследование пульсаций потока при обтекании тела с каверной и минимизация данных пульсаций [18–20]. Эта задача посвящена снижению шумового фона, создаваемого выемками на поверхности летательных аппаратов. При этом для корректного численного воспроизведения акустических колебаний, порождаемых обтеканием каверны, модели турбулентности класса RANS малопригодны, т.к. акустические колебания в сильной степени гасятся турбулентной вязкостью. Для корректного воспроизведения акустических колебаний следует использовать вихре-разрешающие вычислительные технологии типа LES или DES, что, однако, влечет за собой существенное увеличение расчетных ресурсов. Поскольку влияние акустических колебаний на перестройку режимов обтекания каверны неочевидно, на первом этапе исследований ими целесообразно пренебречь в пользу более быстрого получения результатов в рамках вычислительной технологии RANS/URANS.

2. Постановка задачи

Численно исследуется осесимметричное сверхзвуковое обтекание цилиндрического тела с коническим наконечником и поперечной кольцевой каверной (рис. 1). Угол полураствора конуса $\beta = 20^\circ$, длина каверны $L = 53 \div 117$ мм, глубина каверны $h = 8$ мм, диаметр внутреннего цилиндра $d = 29$ мм, диаметр обечайки и хвостовой части $D = 45$ мм. Результаты расчета сравниваются с экспериментом [12]. Основным параметром при сравнении эксперимента с расчетом служит давление в области датчика, расположенного на середине заднего уступа каверны. Целью данного исследования является определение условий, при которых происходит перестройка течения в каверне при непрерывном изменении ее длины, и исследование влияния скорости изменения длины каверны на перестройку течения.

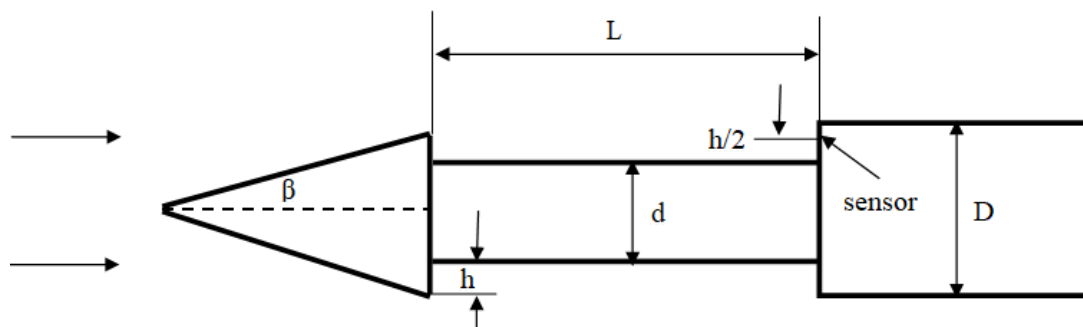


Рис. 1. Геометрия тела с каверной, варьируемой длины

Численное моделирование выполняется в программном комплексе FlowVision. Решаются уравнения Рейнольдса, уравнение энергии, записанное через полную энтальпию, и уравнения для турбулентных переменных. В процессе выбора математической модели рассматриваются четыре различных модели турбулентности: стандартная и квадратичная k - ϵ модели турбулентности, SST модель турбулентности и SA модель турбулентности. Описание математических моделей, численных методов и граничных условий, используемых во FlowVision при моделировании турбулентных течений, приведено в работах [21–22]. Расчетная область представляет собой 5-градусный сектор, ось которого совпадает с осью обтекаемого тела. Хвостовая часть тела продлена до границы расчетной области. На поверхности обтекаемого тела задано граничное условие теплоизолированная стенка с логарифмическим законом для скорости и турбулентных переменных. На плоскостях симметрии задано граничное условие симметрия. На входной и выходных границах области задано неотражающее граничное условие. Параметры потока на неотражающем граничном условии соответствуют параметрам потока в эксперименте: $M = 3$, $p_\infty = 11706$ Па, $T_\infty = 98.2$ К, $Re(D) = 1.58 \times 10^6$, $V_\infty = 596.5$ м/с. Рабочая сплошная среда – воздух.

3. Выбор расчетной модели

Перед проведением основных расчетов было проведено исследование модели на сходимость по расчетной сетке и выбрана оптимальная модель турбулентности. Исследования проводились на примере статических вариантов с неизменной длиной каверны, соответствующих наибольшей и наименьшей длине каверны 53 мм и 117 мм ($L/h = 6.625$ и 14.625). Для ускорения расчета в области каверны изначально задается нулевая скорость потока, а также давление и температура, соответствующие параметрам торможения $p = 430000$ Па, $T = 275$ К. В остальной расчетной области начальные условия задаются совпадающими с параметрами невозмущенного сверхзвукового потока, как на входной границе. В качестве критериев сходимости использовались динамика коэффициента сопротивления обтекаемого тела и динамика давления на середине заднего уступа каверны, в месте расположения датчика в эксперименте [12]. Конечное значение давления на датчике сравнивалось с результатами эксперимента. Для удобства анализа данных далее приводятся только значения безразмерного давления p/p_∞ , равного отношению местного статического давления p к давлению в невозмущенном потоке p_∞ .

3.1. Исследование сходимости по расчетной сетке

Для моделирования использовалась осесимметричная расчетная область с размерами 0.25×0.125 м и расстоянием от входа до обтекаемого тела 0.0355 м. Невозмущенный поток газа сверхзвуковой. Поэтому, чтобы проверить отсутствие влияния размеров расчетной области на течение около обтекаемого тела, достаточно показать, что поток около границ расчетной области движется со сверхзвуковой скоростью и не имеет аномалий на границе. Для этого были проведены предварительные контрольные расчеты для обеих конфигураций с

использованием равномерной расчетной сетки 200×100 и стандартной k-ε модели турбулентности. Результаты расчетов показали, что практически во всей расчетной области скорость потока больше скорости звука, поле давления и числа Маха не имеет аномалий на границе, а течение в каверне соответствует ранее описанным схемам (рис 2).

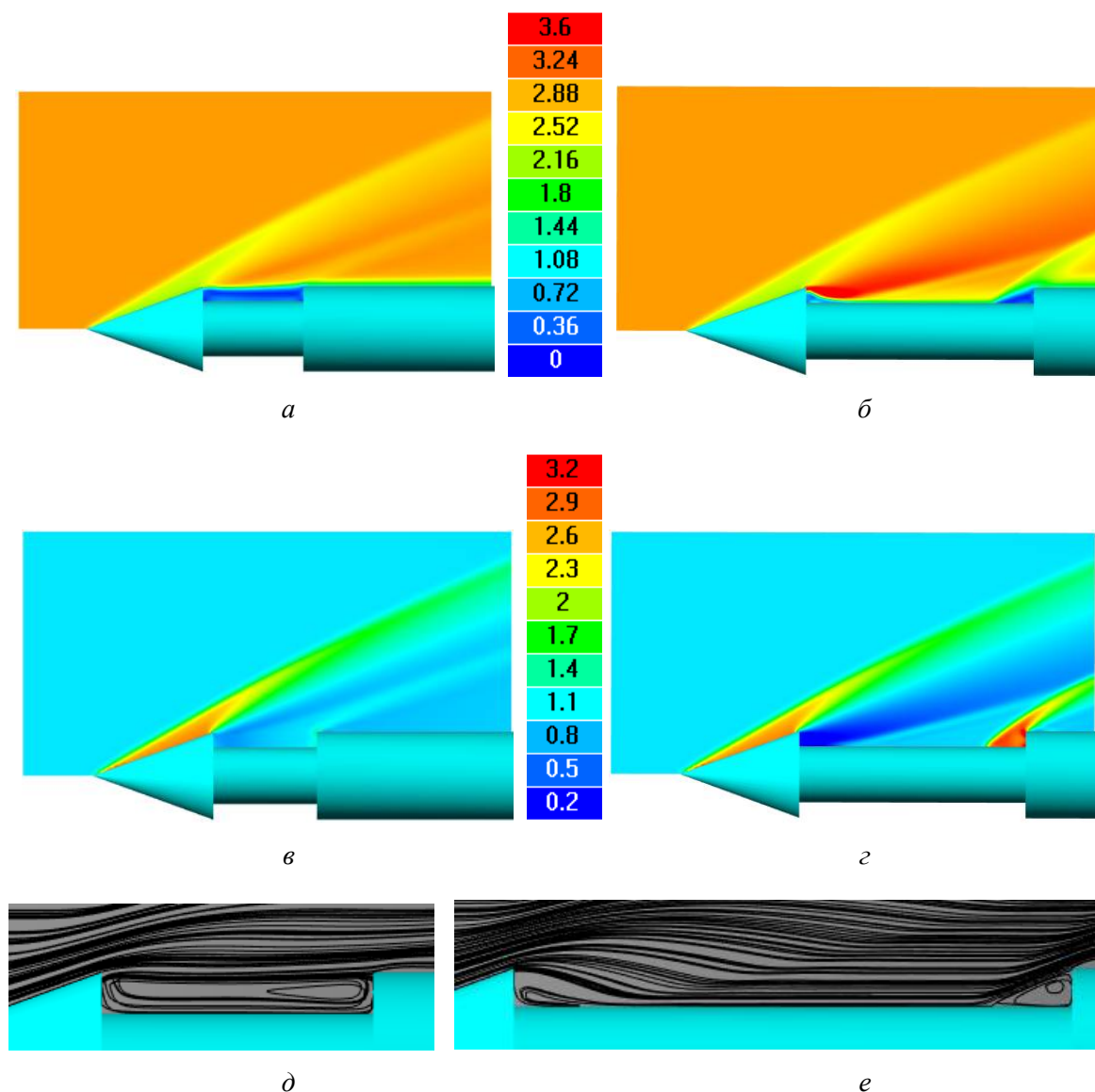


Рис. 2. Результаты расчетов поля числа Маха около обтекаемого тела при $L/h=6.625$ (а) и $L/h=14.625$ (б), поле безразмерного давления около обтекаемого тела при $L/h=6.625$ (в) и $L/h=14.625$ (д), линии тока в каверне при $L/h=6.625$ (е) и $L/h=14.625$ (ф)

При исследовании сходимости по сетке использовалась стандартная расчетная область 0.25×0.125 м и стандартная k-ε модель турбулентности. В данной задаче наиболее сложное течение с системой скачков и возвратных зон реализуется в каверне. Следовательно, область внутри каверны требует большего разрешения по сравнению с остальной областью течения. В качестве основного инструмента для измельчения расчетной сетки при исследовании сходимости было использовано локальное разбиение ячеек до указанного уровня. Разбиение ячеек до n-го уровня означает последовательное деление каждой ячейки, попавшей в зону разбиения, пополам по каждому направлению n раз. Более подробно данная технология описана в работе [22] и в документации FlowVision. Рассматривалось пять вариантов расчетной сетки: равномерная расчетная сетка 200×100 без разбиения (Grid0)

(рис. 3,а), равномерная расчетная сетка 200×100 с разбиением до первого (Grid1), второго (Grid2) (рис. 3,б) и третьего (Grid3) уровней в районе каверны и неравномерная расчетная сетка (Grid4), размер ячейки которой в каверне соответствует размеру ячейки при равномерной расчетной сетке 200×100 со вторым уровнем разбиения. Более подробно параметры расчетных сеток представлены ниже (табл. 1). Для определенности приведены параметры при длине каверны $L/h = 14.625$. Поскольку на расчетной сетке Grid3 $y^+ = 1.2$, на поверхности обтекаемого тела используется граничное условие, соответствующее ламинарному подслою.

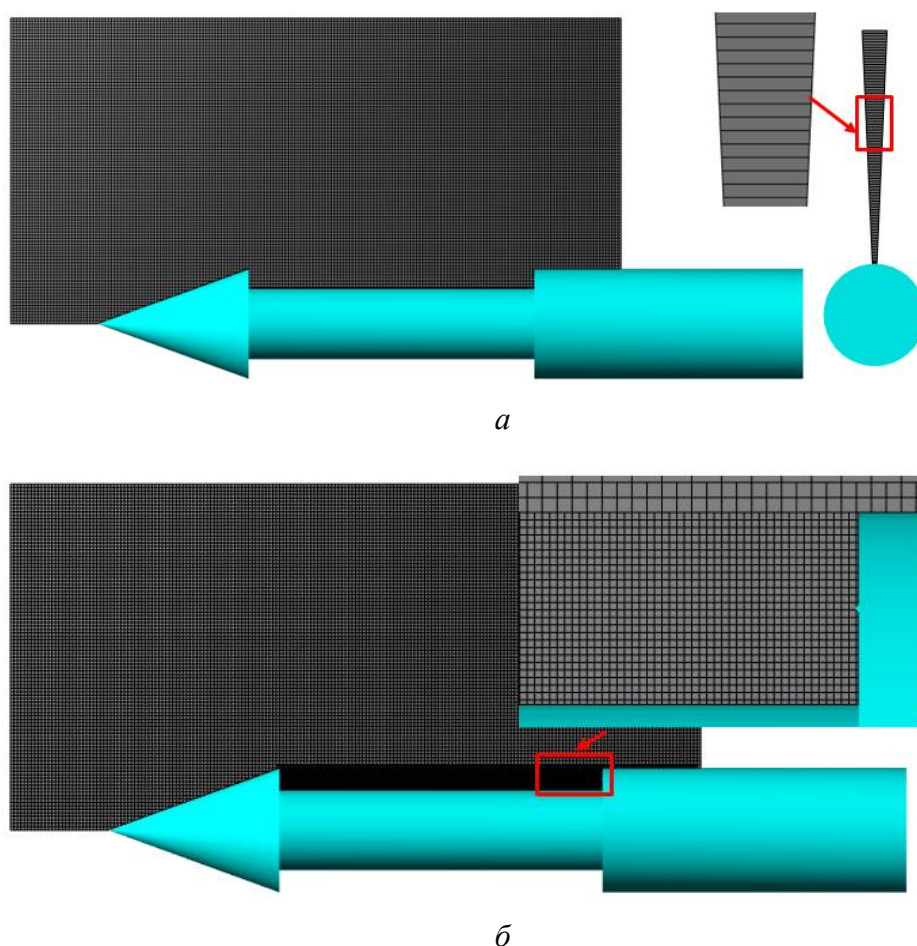


Рис. 3. Вид расчетных сеток Grid0 (а), Grid2 (б) при длине каверны $L/h = 14.625$

Таблица 1

Параметры расчетных сеток при длине каверны $L/h = 14.625$

Название сетки	Размер начальной сетки	Уровень разбиения в каверне	Размер ячейки в каверне, мм	Общее число ячеек	y^+
Grid0	200×100	0	1.25	18 030	54.7
Grid1	200×100	1	0.625	19 805	47.2
Grid2	200×100	2	0.3125	27 620	17.12
Grid3	200×100	3	0.15625	55 720	1.2
Grid4	746×246	0	0.25	136 900	21.2

В ходе исследования было установлено, что изменения безразмерного давления в области датчика не во всех случаях соответствовали изменению коэффициента сопротивления обтекаемого тела. Так, при длине каверны $L/h=6.625$ и открытой схеме течения значения коэффициента сопротивления c_x , полученные на разных сетках, отличаются друг от друга в пределах 3%. В то же время значения давления, полученные при данной конфигурации на разных сетках, отличаются друг от друга на 17% (табл. 2). При замкнутой схеме течения и длине каверны $L/h=14.625$, существенно отличается от остальных только значение, полученное на расчетной сетке Grid0, а остальные отличаются друг от друга в пределах 5% (табл. 3). При этом, отличия между значениями давления на разных сетках может достигать 20%. Более того, в данной конфигурации отличия проявляются и на более подробных сетках. Например, значения, полученные на Grid2 и Grid3, а также на Grid2 и Grid4, отличаются друг от друга на 5%. Это вызвано тем, что датчик расположен в области высоких градиентов и решение в ней продолжает меняться и на более подробных сетках. Это видно по распределению давления на дне каверны (рис. 4), наибольшие различия на расчетных сетках наблюдаются около заднего уступа, особенно – в случае замкнутого течения в области отрыва потока. При этом на остальной поверхности каверны имеются некоторые отличия между результатами, полученными на сетках Grid0, Grid1 и Grid2, и почти нет отличий между результатами для сеток Grid2, Grid3, Grid4. Размеры возвратной зоны около заднего уступа, полученные на сетках Grid2, Grid3 и Grid4, также совпадают. Следует отметить, что время расчета при использовании сеток Grid3 и Grid4 существенно больше, чем для Grid2. Принимая во внимание все вышеперечисленное, можно считать, что расчетная равномерная сетка 200×100 со вторым уровнем адаптации в каверне (Grid2) является оптимальной расчетной сеткой для данной задачи.

Таблица 2

Значение коэффициента сопротивления c_x и давления на датчике p/p_∞ , полученные в эксперименте (Exp) [12] и при моделировании на разных сетках (Grid0, Grid1, Grid2, Grid3, Grid4) при длине каверны $L/h = 6.625$

	Exp	Grid0	Grid1	Grid2	Grid3	Grid4
c_x	–	0.363	0.360	0.356	0.356	0.359
p/p_∞	1.00 ± 0.015	1.17	1.08	1.04	1.03	1.00

Таблица 3

Значение коэффициента сопротивления c_x и давления на датчике p/p_∞ , полученные в эксперименте (Exp) [12] и при моделировании на разных сетках (Grid0, Grid1, Grid2, Grid3, Grid4) при длине каверны $L/h = 14.625$.

	Exp	Grid0	Grid1	Grid2	Grid3	Grid4
c_x	–	0.612	0.557	0.545	0.535	0.56
p/p_∞	2.38 ± 0.036	3.00	2.52	2.35	2.25	2.50

3.2. Выбор модели турбулентности

При выборе модели турбулентности использовалась равномерная расчетная сетка 200×100 со вторым уровнем разбиения в каверне (Grid2). В качестве критерия выбора модели использовалось соответствие значения давления в области датчика результатам эксперимента [12].

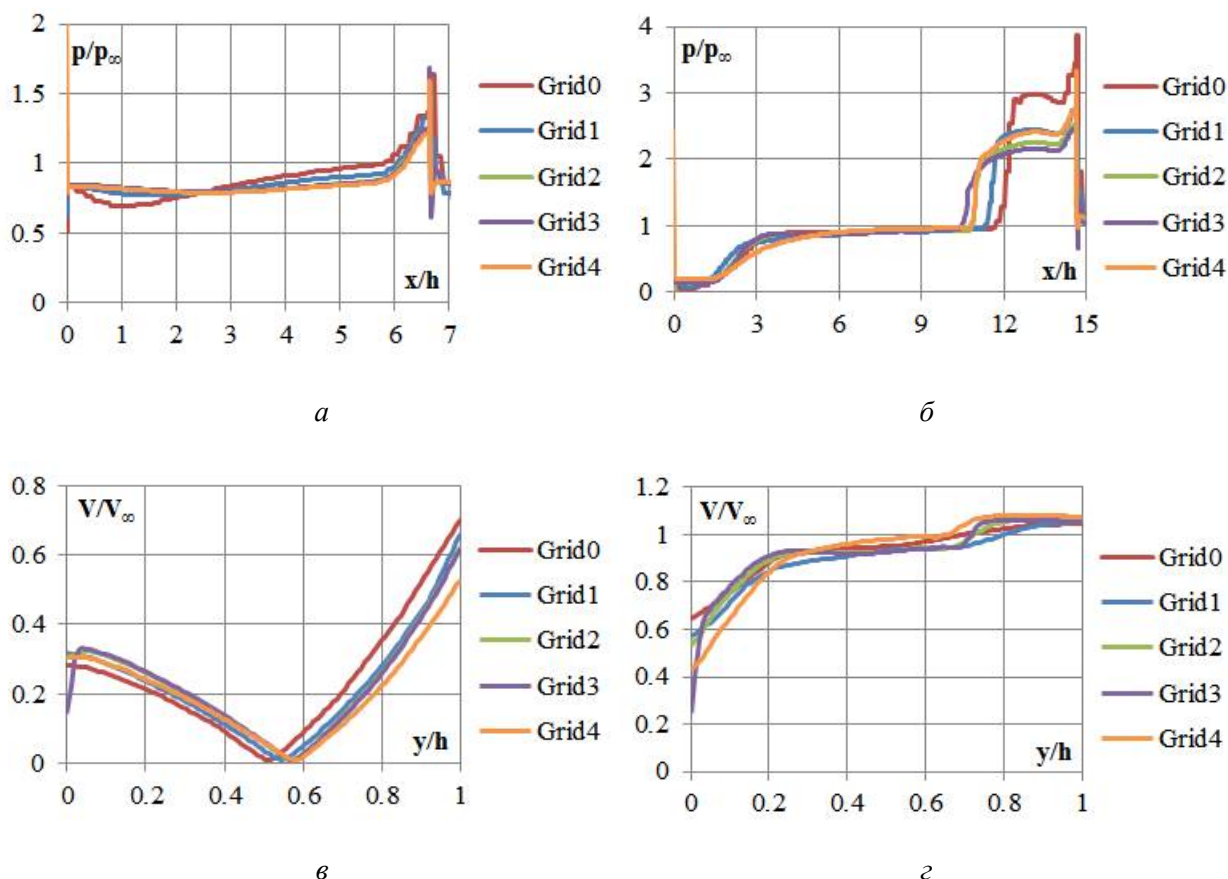


Рис. 4. Распределение давления по дну каверны при $L/h=6.625$ (а) и $L/h=14.625$ (б); профиль модуля скорости на расстоянии 40 мм от переднего уступа при $L/h=6.625$ (в) и $L/h=14.625$ (г) на различных расчетных сетках

Исследование показало, что наиболее близкие к эксперименту результаты в обеих конфигурациях получаются при использовании стандартной и квадратичной k-ε моделей турбулентности (табл. 4, табл. 5). Также с использованием стандартной k-ε модели турбулентности были проведены дополнительные расчеты при длинах каверны $L/h=7$ мм и $L/h=13.2$, для которых были получены ширен-изображения поля течения в эксперименте. Из результатов расчетов видно, что картины течения, полученные при моделировании, хорошо совпадают с экспериментом (рис. 5).

Таблица 4

Значение коэффициента сопротивления c_x и давления на датчике p/p_∞ , полученные в эксперименте (Exp) [12] и при моделировании с использованием стандартной k-ε модели турбулентности (KES), квадратичной k-ε модели турбулентности (KEQ), SST модели турбулентности (SST), SA модели турбулентности (SA) при длине каверны $L/h = 6.625$.

	Exp	KES	KEQ	SST	SA
c_x	–	0.356	0.356	0.333	0.416
p/p_∞	1.00 ± 0.015	1.04	1.04	1.05	1.51

Таблица 5

Значение коэффициента сопротивления c_x и давления на датчике p/p_∞ , полученные в эксперименте (Exp) [12] и при моделировании с использованием стандартной к-ε модели турбулентности (KES), квадратичной к-ε модели турбулентности (KEQ), SST модели турбулентности (SST), SA модели турбулентности (SA) при длине каверны $L/h = 14.625$.

	Exp	KES	KEQ	SST	SA
c_x		0.545	0.528	0.516	0.534
p/p_∞	2.38 ± 0.036	2.34	2.21	2.02	2.18

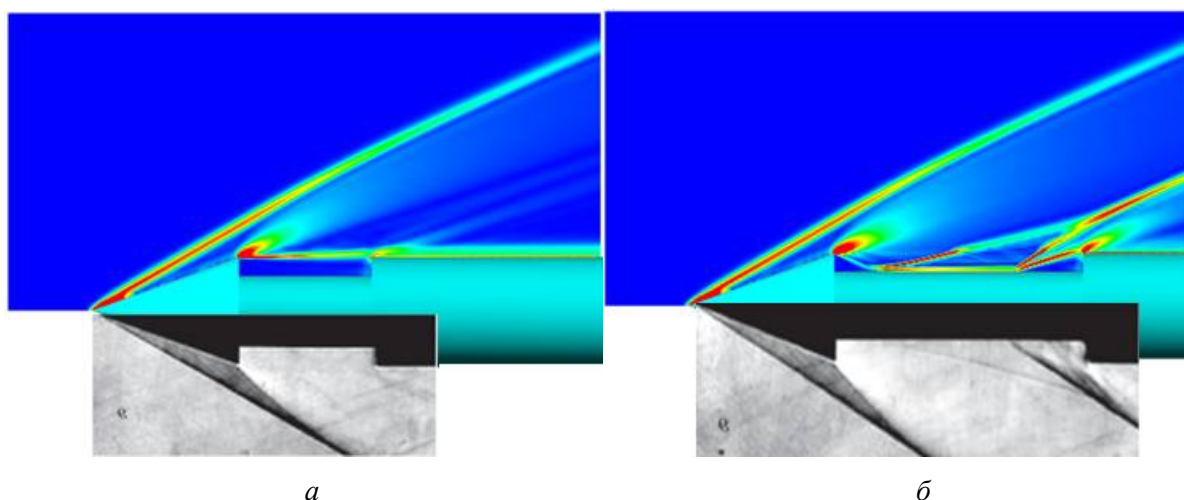


Рис. 5. Сравнение с экспериментом [12] поля градиента плотности около обтекаемого тела при $L/h=7$ (а) и $L/h=13.2$ (б)

Помимо этого, было проведено дополнительное сравнение с результатами эксперимента на другой модели [14]. При этом моделировалось сверхзвуковое обтекание тела, сходного по форме с рассмотренным ранее, но с другими размерами. Угол полу-раствора конуса $\beta = 16^\circ$, длина каверны $L = 37$ мм, глубина каверны $h = 3$ мм, диаметр внутреннего цилиндра $d = 9$ мм, диаметр обечайки и хвостовой части $D = 15$ мм. Параметры набегающего потока составляли $M = 2.2$, $p = 25\,250$ Па, $T = 146.34$ К, $Re(D) = 0.48 \times 10^6$, $V = 533.5$ м/с. При моделировании использовалась осесимметричная расчетная область, аналогичная используемой в предыдущей задаче, с размерами 0.125×0.4 м и расчетная сетка 300×100 с разбиением до 2 уровня в районе каверны. Для того чтобы повторно не исследовать сходимость по расчетной области и расчетной сетке, их параметры выбирались максимально приближенными к рассмотренной выше задаче по соотношениям с обтекаемым телом. При заданных в задаче физических параметрах реализовывалась замкнутая картина течения в каверне. Были проведены расчеты с использованием всех четырех рассмотренных ранее моделей турбулентности. Распределение давления по дну каверны, полученное в результате расчетов на всех моделях турбулентности, сравнивалось с результатами эксперимента [14] и с результатами расчета [15–16] (рис. 6). Сравнение показало, что результаты эксперимента наилучшим образом воспроизводятся на стандартной к-ε модели турбулентности. Таким образом, можно считать, что стандартная к-ε модель турбулентности больше всего подходит для рассматриваемой задачи.

В результате проведенных исследований для моделирования сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с каверной выбрана расчетная область 0.25×0.125 м, равномер-

ная расчетная сетка 200×100 с разбиением до 2 уровня в области каверны и стандартная k- ϵ модель турбулентности.

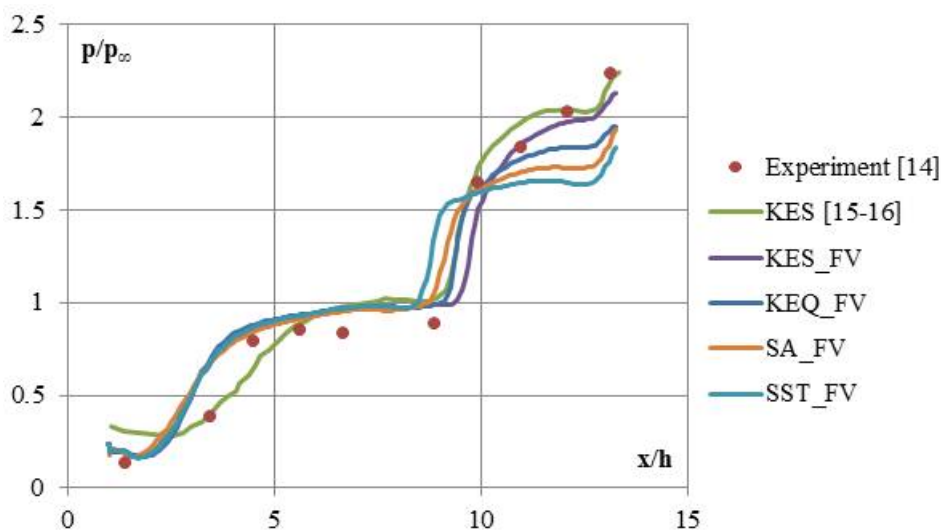


Рис. 6. Распределение давления по дну каверны, полученное в эксперименте [14], расчетах, описанных в [15–16] и в расчетах на FlowVision с использованием различных моделей турбулентности

4. Исследование гистерезиса

Используется математическая модель, представленная выше. В качестве начального приближения берутся решения, полученные при максимальной ($L/h=14.625$) или минимальной ($L/h=6.625$) длине каверны и при неподвижном заднем уступе каверны. В процессе расчета задний уступ каверны движется с постоянной скоростью. Алгоритмы, используемые для моделирования движения элементов конструкции во FlowVision, описаны в работе [22]. Для исследования гистерезиса для каждого значения скорости проводится два расчета. Первый расчет соответствует уменьшению размера каверны с максимального значения до минимального. Второй расчет соответствует увеличению размера каверны с минимального до максимального. Исследование проводится для скоростей движения заднего уступа $V=0.002 \div 10$ м/с. В качестве контрольного параметра, как и в предыдущих расчетах, используется давление в области датчика.

На графике зависимости давления в контрольной точке от длины каверны наблюдаются характерные петли гистерезиса, соответствующие различным скоростям движения заднего уступа каверны (рис. 7). Нижние части всех петель соответствуют увеличению длины каверны, а верхние – уменьшению. Из результатов расчетов видно, что при скорости движения заднего уступа каверны меньше 0.1 м/с петли гистерезиса совпадают, и при данных скоростях реализуется гистерезис второго рода, не зависящий от скорости изменения контрольного параметра [17]. Напротив, при скорости движения больше 0.1 м/с петли гистерезиса уже не совпадают друг с другом и при увеличении скорости наблюдается последовательное уширение петель гистерезиса. Следовательно, при скорости больше 0.1 м/с реализуется гистерезис первого рода, зависящий от скорости изменения контрольного параметра [17].

Для сравнения с экспериментом представлена петля гистерезиса, полученная в опытах с невозмущенным и с турбулизированным потоком при скорости движения заднего уступа каверны $V=0.002$ м/с. Турбулизатор в виде шероховатой кольцевой полоски был установлен симметрично на поверхности конуса на расстоянии 20 мм от вершины, толщина турбулизатора была менее 1 мм, ширина – 5 мм, условия испытаний соответствовали условиям,

описанным в работе [12] для модели с углом полу-раствора головного конуса 20° . Видно, что результаты расчетов качественно совпадают с опытными данными, однако, еще до перехода из замкнутого режима течения в открытый давление в контрольной точке начинает монотонно снижаться, в то время, как в экспериментах оно колеблется около постоянного значения.

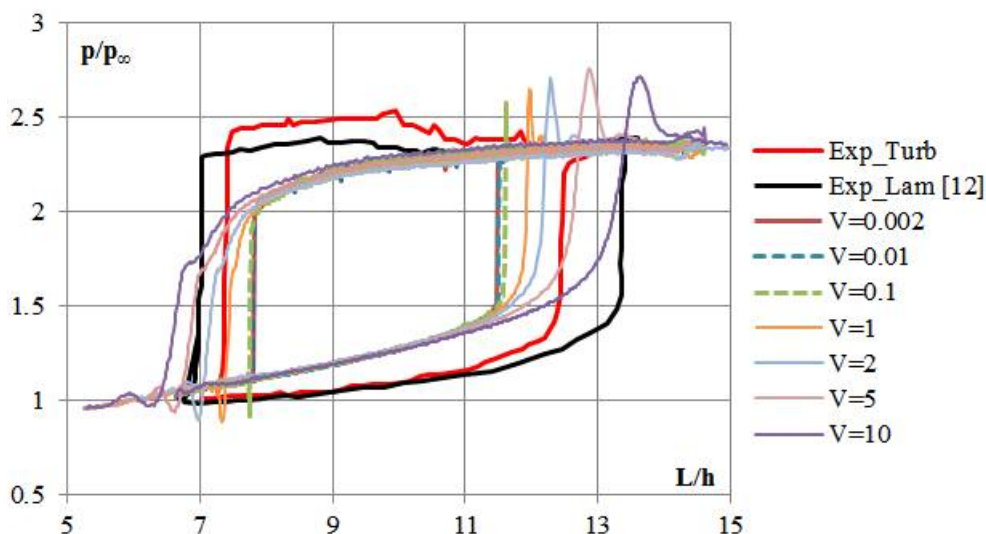


Рис. 7. Изменение давления на датчике, полученное при различных скоростях движения заднего уступа каверны

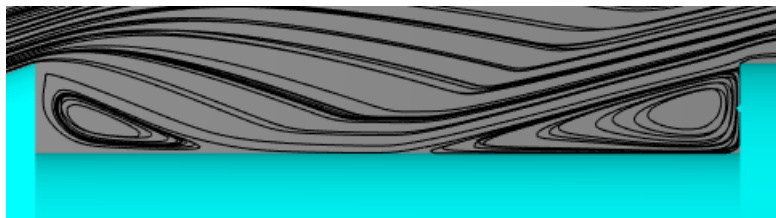
Наиболее вероятная причина этого расхождения – трехмерный характер течения в каверне, который не воспроизводится в рамках выбранной математической модели. Также, петля гистерезиса в расчете получается более узкой, чем в обоих экспериментах. Результаты расчетов существенно ближе к результатам эксперимента с турбулизатором. Это ожидаемо, поскольку в расчете поток изначально турбулентный, а в экспериментах без искусственного турбулизатора обтекание головной части тела могло быть ламинарным. Следует отметить, что размеры возвратных зон при замкнутом течении в расчетах и эксперименте совпадают (табл. 6).

Таблица 6

Сравнение результатов расчета с экспериментом при $V=0.002$:
 $(L/h)_O$ – размер каверны при переходе к открытому течению,
 $(L/h)_C$ – размер каверны при переходе к закрытому течению,
 $(x/h)_D$ – размер передней возвратной зоны, $(x/h)_F$ – размер задней возвратной зоны, $\Delta(x/h)_O$ – расстояние между отрывными зонами при открытии каверны, $\Delta(x/h)_C$ – расстояние между отрывными зонами при закрытии каверны

	Эксперимент без турбулизатора [12]	Эксперимент с турбулизатором	Расчет
$(L/h)_O$	7.0	7.4	7.8
$(L/h)_C$	13.3	12.5	11.5
$(x/h)_D$	2.0		2.0 ÷ 3.0
$(x/h)_F$	3.4 ÷ 4.0		3.75 ÷ 4.00
$\Delta(x/h)_O$	1.6		1.8 ÷ 0.8
$\Delta(x/h)_C$	7.3		4.75 ÷ 5.75

С целью анализа механизма перехода от одного режима течения к другому, рассмотрим изменение линий тока перед переходом и непосредственно во время перехода. При уменьшении длины каверны переход от замкнутого течения к открытому происходит за счет слияния возвратных зон около заднего и переднего уступов каверны в единую циркуляционную зону, заполняющую весь объем каверны. При этом, следует отметить, что перед слиянием возвратные зоны непосредственно не соприкасаются друг с другом, а расстояние между ними составляет порядка $L/4$ (рис. 8).



$$L/h = 7.85$$



$$L/h = 7.8$$

Рис. 8. Переход от замкнутого течения к открытому

С другой стороны, при непрерывном увеличении длины каверны, задолго до собственно перехода при $L/h=10$, внутри единой циркуляционной зоны происходит зарождение и постепенный рост двух вихревых ядер отрицательного знака (рис. 9). За счет этого, в центре каверны образуется "прогиб" потока, и в каверну начинает частично заходить внешний поток, который, при дальнейшем увеличении длины каверны до $L/h=11.5$ достигает дна и приводит к окончательному распаду единой циркуляционной зоны. В результате происходит замыкание каверны с образованием двух изолированных областей возвратного течения, локализующихся у переднего и заднего уступов каверны.

5. Заключение

В вычислительной среде пакета FlowVision сформирована модель сверхзвукового турбулентного обтекания осесимметричного тела с поперечной кольцевой каверной, проведено исследование сходимости по расчетной области и расчетной сетке, выбрана оптимальная модель турбулентности, выполнено тестирование, показавшее хорошее совпадение расчета с различными экспериментами для тела с постоянной длиной каверны. Численно исследовано сверхзвуковое турбулентное обтекание тела с каверной, длина которой непрерывно изменяется с различной скоростью. Воспроизведен и исследован наблюдавшийся ранее в эксперименте аэродинамический гистерезис при перестройке схем обтекания кольцевой каверны по мере непрерывного изменения ее длины. Впервые получена оценка диапазонов скоростей изменения длины каверны, при которых реализуются гистерезисные режимы первого или второго рода. Выявлены детали механизмов прямой и обратной перестройки режимов течения в каверне.

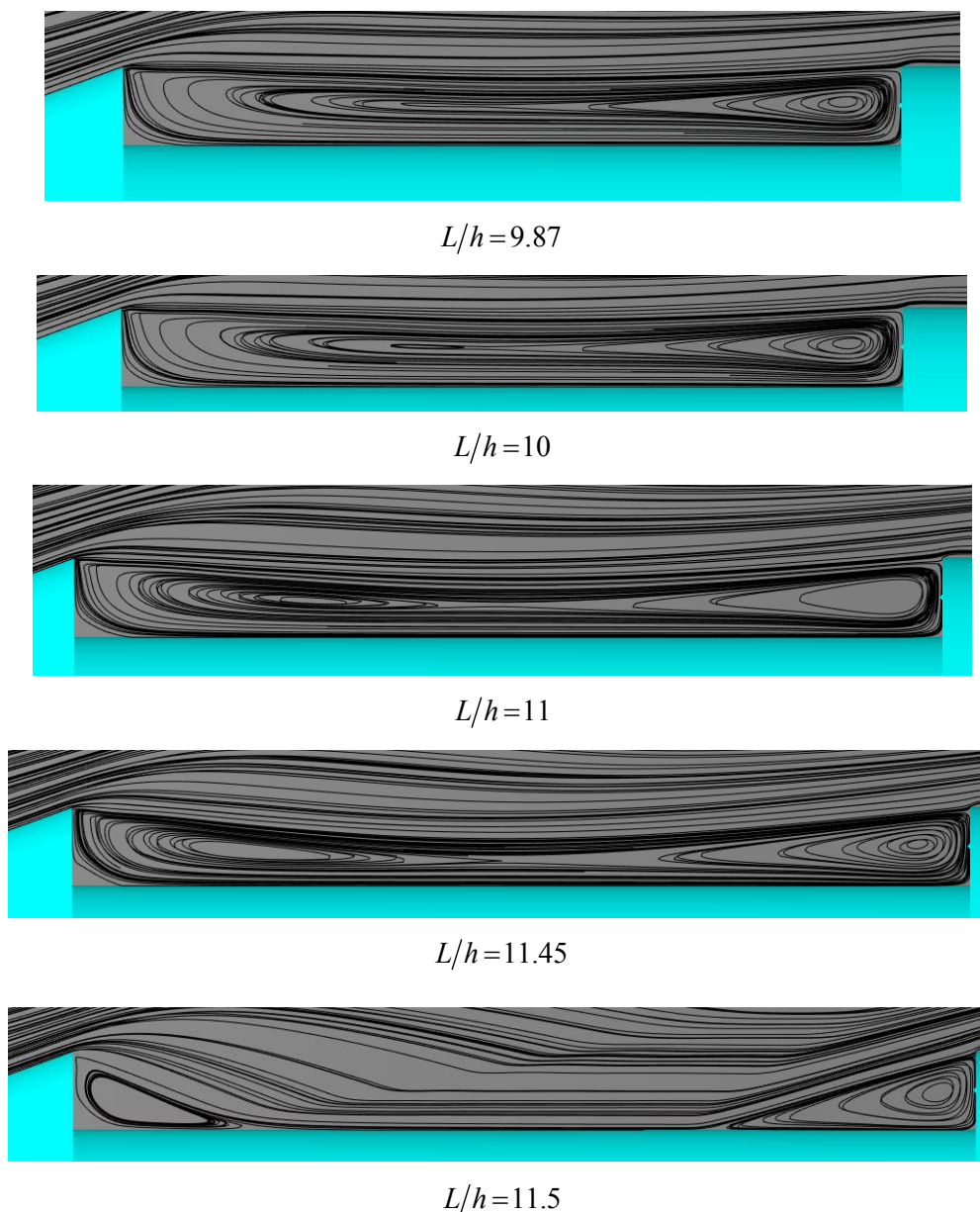


Рис. 9. Стадии перехода от открытого течения к замкнутому

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Президента Российской Федерации (грант МК-5514.2016.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-01-99623).

Литература

1. Калугин А.И., Луценко А.Ю., Столярова Е.Г. Гистерезисные явления при обтекании затупленных тел в трансзвуковом потоке // Космонавтика и ракетостроение. 2009. Вып. 1 (54). С. 79–93.
2. Гужавин А.И., Коробов Я.П. О гистерезисе сверхзвуковых отрывных течений // Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. №2. С. 116–125.
3. Charwat A.F., Roos J.N., Dewey F.C., Hitz J.A. An investigation of separated flows. Part I: The pressure field // J. Aerosp. Sci. 1961. V. 28, № 6, P. 457–470. <https://doi.org/10.2514/8.9037>
4. Charwat A.F., Roos J.N., Dewey F.C., Hitz J.A. An investigation of separated flows. Part II: Flow in the cavity and heat transfer // J. Aerosp. Sci. 1961. V. 28, № 6, Pp. 513–527. <https://doi.org/10.2514/8.9099>

5. Stalling R. L., Wilcox F. J. Experimental Cavity Pressure Distribution at Supersonic Speeds // NASA TP 2683. 1987.
6. Zhang J., Morishita E., Okunuki T., Itoh H. Experimental investigation on the mechanism of flow-type changes in supersonic cavity flows // Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. 2002. V. 45, № 149, 170–179. <https://doi.org/10.2322/tjsass.45.170>
7. Чжен П. Отрывные течения. Том II. М.: Мир, 1973. 280 с.
8. Гаур, И.А., Елизарова Т.Г., Четверушкин Б.Н. Численное моделирование обтекания каверн сверхзвуковым потоком вязкого сжимаемого газа // ИФЖ. 1991. Т. 61. № 4. С. 570–577.
9. Швец А.И. Исследование течения в цилиндрическом вырезе на осесимметричном теле при сверхзвуковом обтекании // Изв. РАН. МЖГ. 2002. №1. С. 123–131.
10. Гувернюк С.В., Синявин А.А. Об управлении гистерезисом сверхзвукового обтекания прямоугольной каверны с помощью теплового импульса // Успехи механики сплошных сред: к 70-летию академика В. А. Левина: сб. науч. тр. Владивосток: Дальнаука, 2009.
11. 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.
12. 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.
13. Гувернюк С. В., Максимов Ф. А. Сверхзвуковое обтекание плоской решетки цилиндрических стержней // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2016. Т. 56, № 6. С. 1025–1033.
14. 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>
15. 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. 16. Вып. 2. С.1–10. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-2/articles/583/>
16. Ivanov I.E., Kryukov I.A., Larina E.V., Glushko G.S. Turbulent flow over an axisymmetric body with annular cavity // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 815. № 1. Pp. 1–8.
17. Хатунцева О.Н. Классификация гистерезисных функций. Теоретические модели и методы описания // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 13. Вып. 1. С. 1–23. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-1/articles/300/>
18. Sinha J., Das S., Kumar P., Prasad J.K. Computational Investigation of Control Effectiveness on a Near Transition Open and Closed Axisymmetric Cavity // Advances in Aerospace Science and Applications. 2014. V. 4. № 1. Pp. 45–52.
19. Named A., Das K., Basu D. Numerical Simulations of Fluidic Control for Transonic Cavity Flows // 42-nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit: Book of abstracts. - January 5–8, 2004.
20. Gharib M., Roshko A. The effect of flow oscillations on cavity drag // J. Fluid Mech. 1987. V. 177. Pp. 501–530.
21. Жлуктов С.В., Аксенов А.А., Харченко С.А., Москалёв И.В., Сушко Г.Б., Шишаева А.С. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-НПС//Вычислительные методы и программирование, 2010, Т. 11, № 2, С.76–87. http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2010/pdf/v11r128.pdf
22. Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V. Overcoming of barrier between CAD and CFD by modified finite volume method // ASME-PUBLICATIONS-PVP, 1998. V. 337, Pp. 79–83.

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2017 г.