

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБТЕКАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНОЙ КАВЕРНЫ МЕЖДУ СООСНЫМИ ТЕЛАМИ ВРАЩЕНИЯ.

В.А. ГОРЯЙНОВ, С.В. КОННОВ

Московский государственный авиационный институт

(технический университет), Россия

e-mail: Goriaynov@k806.mainet.msk.su

Self-oscillation flow regime is observed in region between longitudinally streamlined co-axial bodies of rotation without external disturbances. A second order modification of Godunov's method was used. It's determined conditions of self-oscillation origin. Grid effects, shock wave structures is analyzed at self-oscillation and steady regimes for slowly increased stream velocity from $M_\infty = 2$ to 7. It's imitated flow in indicated region at inclusion of rocket engine of second step for problem of rocket steps separation.

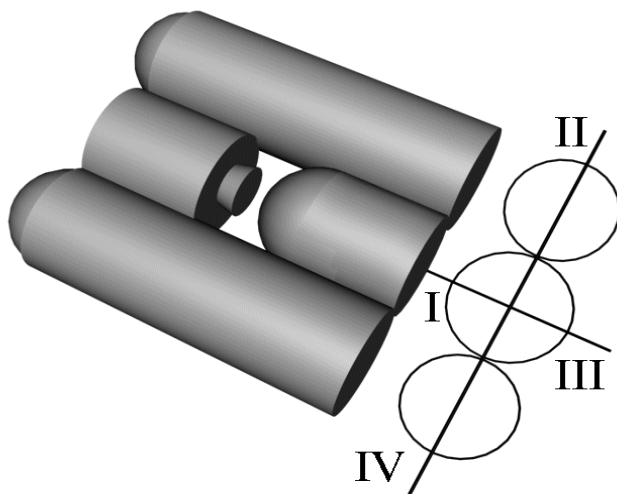
Необходимость изучения процессов, сопровождающих обтекание криволинейной каверны, определяется задачей разделения ступеней многоступенчатых ракет, базовым аспектом которой является газодинамика межступенного отсека. Актуальными являются исследования дополнительных сопротивлений и тепловых потоков на элементы обшивки, резонансных пульсаций давления, порождающих плохопрогнозируемые режимы, нескомпенсированные поперечные силовые воздействия нестационарных потоков на элементы конструкций и как следствие возможность соударения сбрасываемых частей с центральным блоком и ДУ 2-ой ступени на этапе разделения ступеней.

Распространен вариант компоновочной схемы тяжелой РН в виде параллельной связки топливных баков с баками окислителя, в частности, вариант, когда к центральному баку присоединены два боковых бака-блока (см.рис.1). Причём боковые блоки 1-ой ступени по конструкционным соображениям могут нижней частью стыковаться с центральным баком 1-ой ступени, а верхней частью – с центральным баком 2-ой ступени. В результате, межступенный отсек оказывается ограничен плоским задним днищем центрального блока 2-ой ступени с выступающим соплом

ДУ и сферическим передним днищем центрального блока 1-ой ступени в продольном направлении и двумя цилиндрическими боковыми блоками в поперечном направлении (плоскость II-IV на рис.1). Силовая ферма, соединяющая центральные блоки 1-ой и 2-ой ступени, не показанная на рис.1, не оказывает существенного влияния на газодинамику межступенного отсека.

Целью работы является: исследование структуры течения в криволинейной каверне при квазистационарном изменении скорости обтекания в диапазоне $M_\infty = 2 \div 7$, в том числе на этапе разделения ступеней; изучение нестационарных процессов и резонансных свойств каверны заданной конфигурации, в том числе на этапе разделения при ступенчатом наращивании тяги сопла ДУ 2-ой ступени.

1. Ставится задача математического моделирования течения в криволинейной каверне с характерной пространственной конфигурацией, показанной на рис.1, на основе модели Эйлера в квазитрёхмерной постановке в окрестности плоскостей I-III и II-IV. В окрестности плоскости I-III массообмен внешнего потока с течением в каверне осуществляется через границу АВ (см.рис.2) и задача рассматривается в осесимметричной постановке. В плоскости



II-IV межступенный отсек является замкнутым, т.к. граница АВ непроницаема, поскольку она совпадает со стенкой бокового блока. Массообмен здесь осуществляется за счет 3-х мерных течений, которые моделируются специальным заданием источников членов $\mathbf{f}_1(x,y)$ в системе уравнений (1) на границах расчётной области.

Для решения задачи используется метод Годунова второго порядка точности [1],[2]. Алгоритм метода Годунова базируется на пересчете

Рис.1

газодинамических параметров в ячейках сетки при переходе от момента времени t_0 к моменту $t_0 + \tau$ с использованием интегральных законов сохранения.

$$\iint_S (\sigma dx dy + \mathbf{a} dy dt + \mathbf{b} dt dx) = - \iiint_V \frac{1}{y} \mathbf{f} dx dy dt \quad (1)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho uv \\ p + \rho v^2 \\ (e + p)v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_0 = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e + p)v \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_0 + \mathbf{f}_1.$$

После интегрирования соотношения (1) мы приходим к результату такого вида :

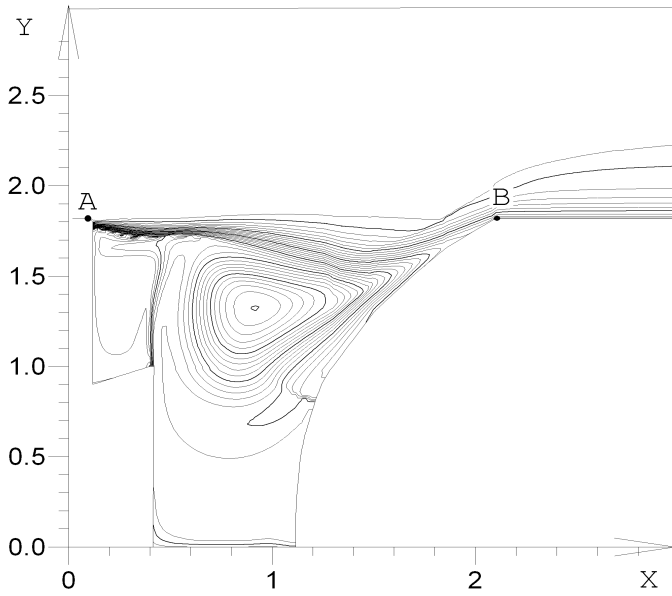
$$\sigma^{j-1/2, k-1/2} \Omega^{j-1/2, k-1/2} = \sigma_{j-1/2, k-1/2} \Omega_{j-1/2, k-1/2} -$$

$$- Q_{j, k-1/2} - Q_{j-1, k-1/2} - Q_{j-1/2, k} - Q_{j-1/2, k-1} - F_{j-1/2, k-1/2}$$

В этой векторной формуле величины $\Omega^{j-1/2, k-1/2}$ и $\Omega_{j-1/2, k-1/2}$ равны площадям верхнего и нижнего оснований ячеек.

Каждая из величин $Q_{j, k-1/2}$, $Q_{j-1, k-1/2}$, $Q_{j-1/2, k}$, $Q_{j-1/2, k-1}$ представляет потоки массы, импульса и энергии через соответствующую из боковых граней и вычисляется через значения на этой грани величин σ , \mathbf{a} и \mathbf{b} и проекции этой грани на координатные плоскости. В качестве базовой бралась сетка размерностью, примерно, 150x150 ячеек.

2. Течение в пространственной криволинейной каверне имеет сложную структуру, которая претерпевает некоторые изменения по мере увеличения скорости обтекания $M_\infty = 2 \div 7$. Во всем диапазоне скоростей доминирующую область в каверне занимает большая и интенсивная циркуляционная зона, наблюдаемая на рис. 2, в плоскости I-III при $M_\infty=4$.



При других скоростях иногда образуются дополнительные циркуляционные зоны в окрестности оси на правой сферической границе, а также в области, примыкающей к верхнему участку левой границы расчетной области (см.рис.3 и 4). Кроме того, в некоторых местах на отдельных интервалах времени появляются застойные зоны.

Рис. 2

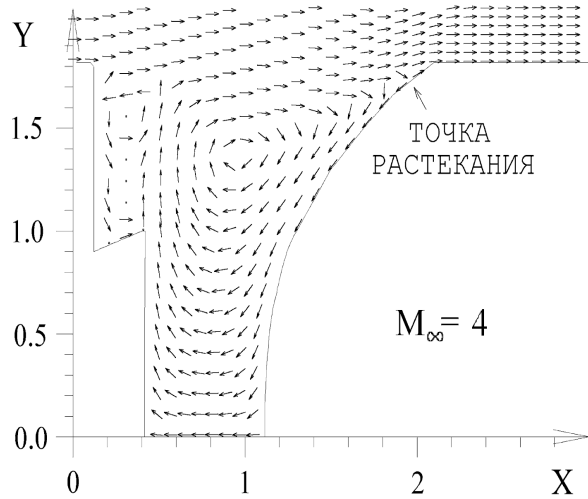


Рис. 3

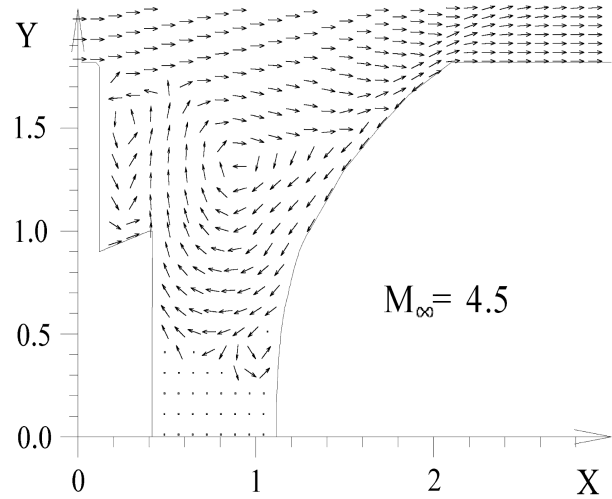


Рис. 4

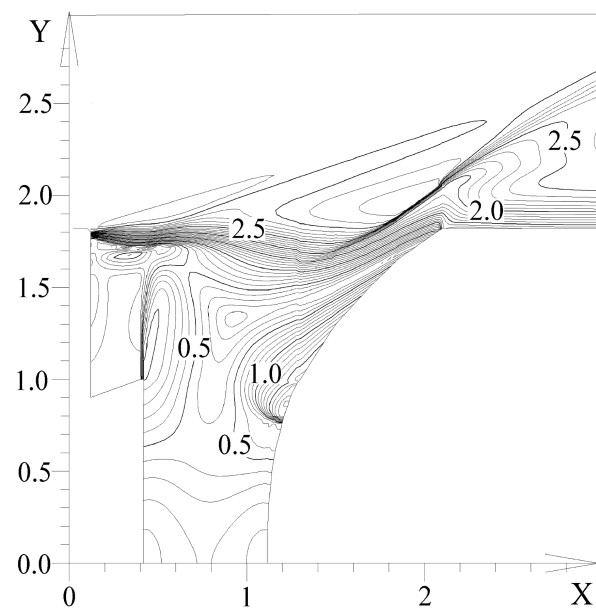


Рис.5

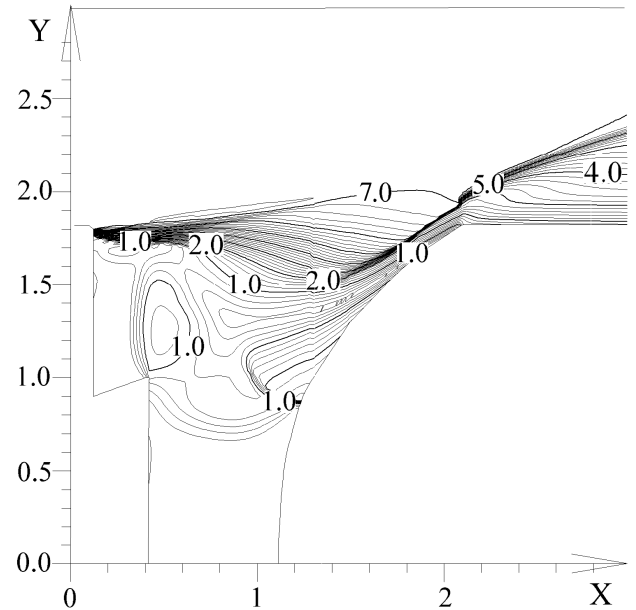


Рис.6

Во всём диапазоне скоростей до запуска сопла ДУ 2-ой ступени на сферическом днище вблизи стыка с боковой цилиндрической стенкой имеется точка растекания потока (см.рис.3). В этой области наблюдается ударная волна, которая как видно на представленных на рис.5 и 6 изолиниях числа Маха ($M_\infty = 3$ и 7 соответственно) с увеличением скорости обтекания приближается к правой сферической границе.

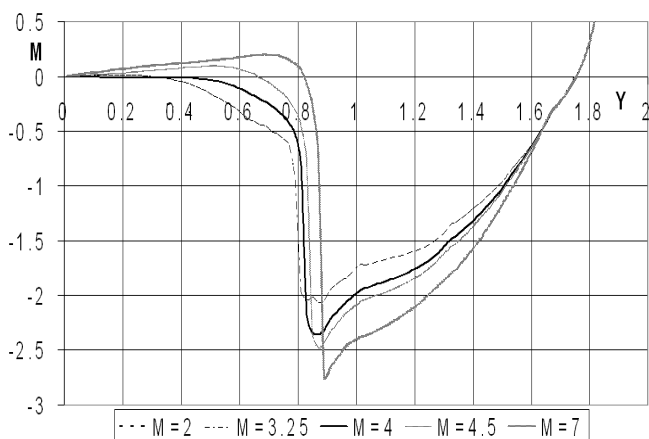


Рис. 7

Ниже точки растекания происходит ускорение течения в направлении оси во всем диапазоне $M_\infty = 2 \div 7$ (рис.7), причём значительная часть сферической поверхности оказывается в зоне сверхзвукового течения во всём рассмотренном диапазоне скоростей обтекания и максимальная скорость течения на сферической границе достигает больших сверхзвуковых значений $M = 2 \div 2.5$. Ускорение происходит примерно до точки $y = 0.8$, где на рис.5 и 6 видна интенсивная ударная волна, сохраняющаяся до запуска сопла. Кроме того, иногда появляются ударные волны в окрестности плоского участка левой границы и над кромкой сопла. Как видно из рис.7, на центральной части сферической границы течение может менять направление в зависимости от изменения скорости обтекания, сопровождающегося образованием различных циркуляционных зон. Таким образом, для структуры течения в криволинейной каверне характерны относительно стабильные ударные волны и большая циркуляционная зона, а также – ударные волны, малые циркуляционные и застойные зоны, имеющие кратковременное существование. Выявленные структуры составляют основу для оценок тепловых и силовых нагрузок на элементы межступенного отсека. В частности, по распределениям безразмерного давления на рис.8 видно, что на большей части сферического днища бака давление превышает атмосферное не больше, чем в 2 раза.

3. Следующей важной газодинамической особенностью межступенного отсека являются нестационарные процессы, связанные с резонансными свойствами отсека, а также возникающие при ступенчатом наращивании тяги сопла ДУ 2-ой ступени до 30% номинальной тяги не посредственно перед подачей команды на разделение ступеней. При изменении скорости полёта почти во всём диапазоне $M_\infty = 2 \div 7$ до запуска сопла газодинамика межступенного отсека имеет, в основном, квазистационарный характер. Структуры течения, имеющие продолжительный период жизни, описанные в п.2, плавно заменяют друг друга. Возникают и исчезают небольшие циркуляционные и застойные зоны, на протяжении полёта меняется направление течения на поверхности центральной части сферического днища (см.рис.7). Процесс сопровождается незначительными пульсациями давления и, в целом, является

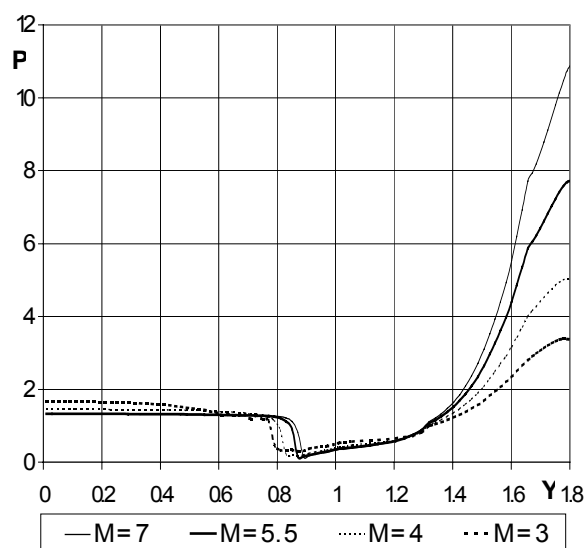


Рис. 8

устойчивым к внешним возмущениям. Исключение составляет узкий диапазон скоростей полёта в окрестности $M_\infty = 4.0$ (см.рис.9). При скорости полёта $M_\infty = 4.0$ в межступенном отсеке возникают незатухающие пульсации давления постоянной амплитуды и частоты, показанные для центральной точки на сферическом днище бака. Для заложенных в расчёт характерных для тяжелой РН линейных размеров отсека и высоты полёта при данном числе Маха частота пульсации составляет около 400 Гц. Только для этого режима в структуре течения присутствует обширная застойная зона между срезом сопла и сферическим днищем бака, наряду с граничащей с внешним потоком большой циркуляционной зоной, размер которой слабо зависит от числа Маха набегающего потока. На других режимах диапазона $M_\infty = 2 \div 7$, если и возникали пульсации давления, то они являлись затухающими подобно показанным на рис.10 для $M_\infty = 3$. Указанные пульсации могли инициироваться схемными факторами, а затухание пульсаций могло зависеть от схемной вязкости. Однако при прочих равных условиях на одном из режимов полёта проявляются аномальные резонансные свойства межступенного отсека. Тем не менее, моделирование газодинамики и акустики отсека подразумевает изменение размеров ячейки расчётной сетки для варьирования схемной вязкостью и исследование отклика системы на вносимые специальным образом внешние возмущения.

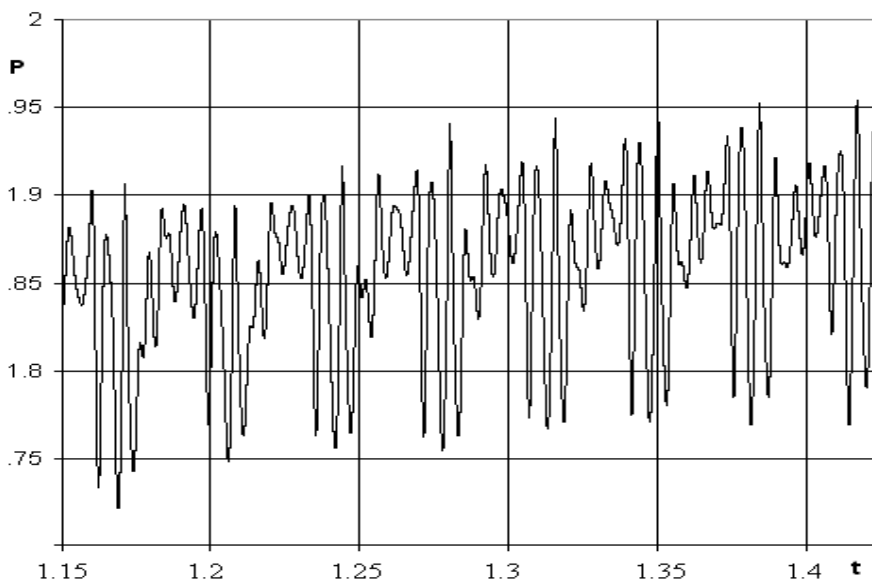


Рис. 9

присутствует обширная застойная зона между срезом сопла и сферическим днищем бака, наряду с граничащей с внешним потоком большой циркуляционной зоной, размер которой слабо зависит от числа Маха набегающего потока. На других режимах диапазона $M_\infty = 2 \div 7$, если и возникали пульсации давления, то они являлись затухающими подобно показанным на рис.10 для $M_\infty = 3$. Указанные пульсации могли инициироваться схемными факторами, а затухание пульсаций могло зависеть от схемной вязкости. Однако при прочих равных условиях на одном из режимов полёта проявляются аномальные резонансные свойства межступенного отсека. Тем не менее, моделирование газодинамики и акустики отсека подразумевает изменение размеров ячейки расчётной сетки для варьирования схемной вязкостью и исследование отклика системы на вносимые специальным образом внешние возмущения.

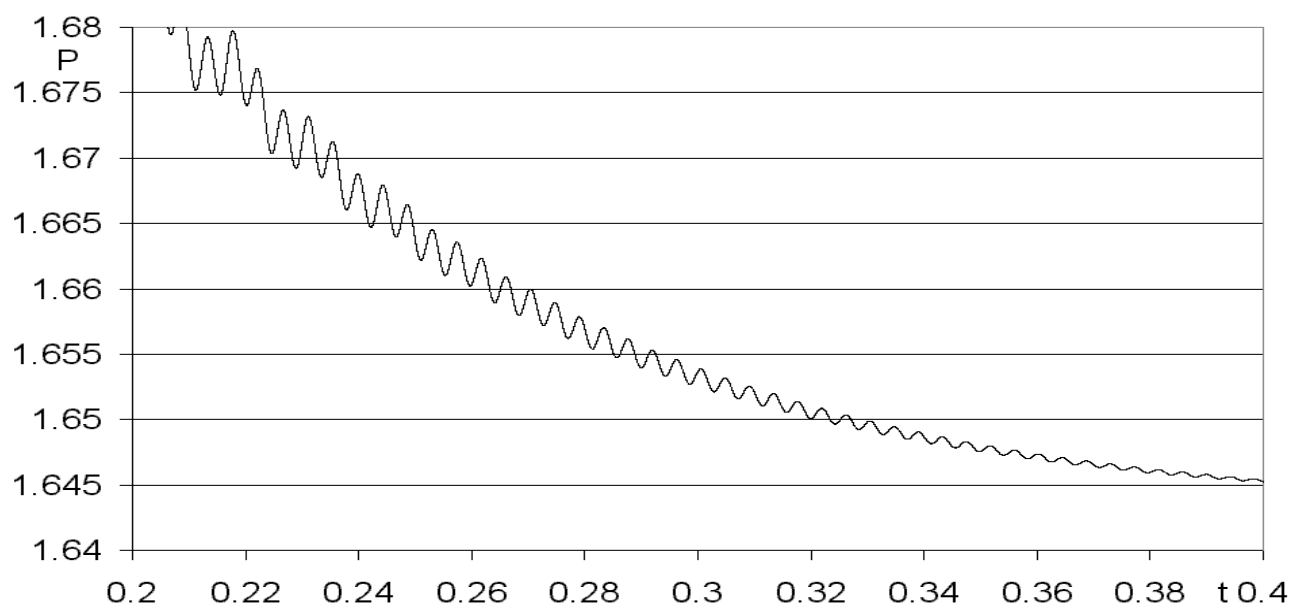


Рис. 10

На рис.11 и 12 приводятся результаты исследования схемной вязкости на процесс затухания пульсаций давления на режиме $M_\infty = 4$. Здесь показаны изменения амплитуды собственных колебаний от времени для разных сеток (рис.11) и изменение скорости затухания собственных колебаний dA/dt в зависимости от линейного размера ячейки (рис.12). Варьировался размер ячеек сетки так, что продольное сечение расчетной области покрывалось сетками в диапазоне от 50x50 до 180x180. По таким данным определялся характерный размер ячейки сетки для дальнейших исследований.

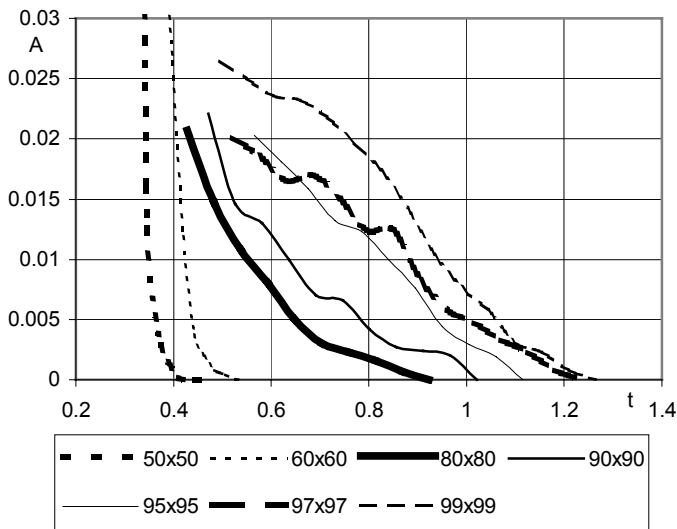


Рис. 11

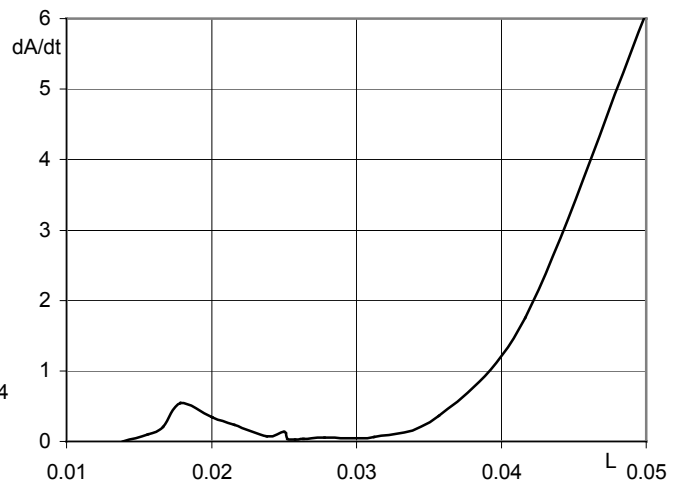


Рис. 12

В установившееся течение вносились возмущения в виде изменения начальных условий на левой границе счетной области. Значение давления на левой границе изменялось по закону $p = p_0 + A_{\text{в03}} \sin(\omega_{\text{в03}} t)$, где p_0 - начальное значение давления равное 1, $A_{\text{в03}}$ - амплитуда возмущения и $\omega_{\text{в03}}$ - частота возмущения. На рис.13 показано изменение давления по време-

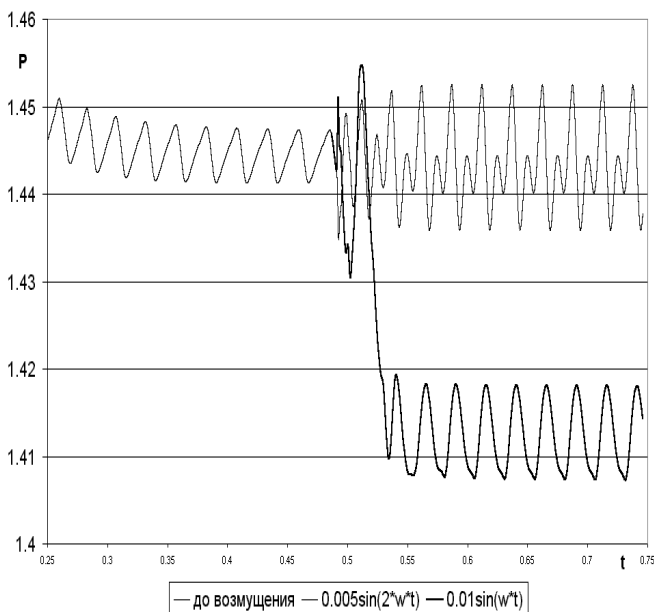


Рис. 13

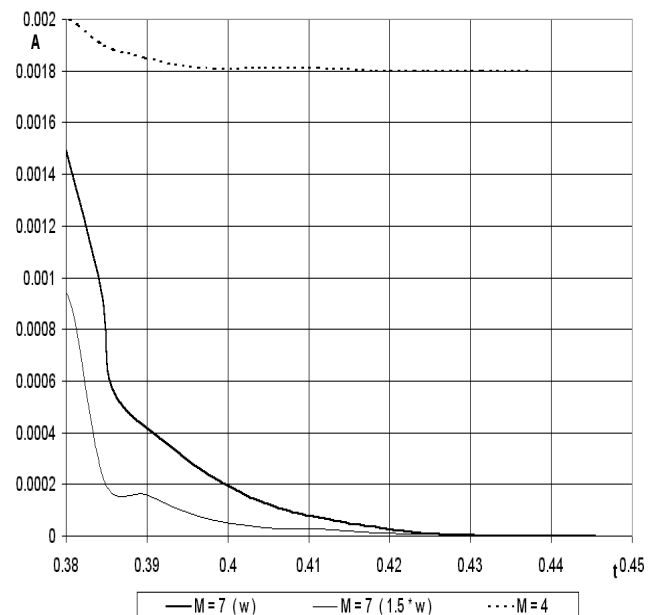


Рис. 14

ни для резонансного случая с внесенным возмущением при частоте возмущения в два раза большей резонансной ($w=\omega_0$) и небольшой амплитудой, а также с частотой возмущения равной резонансной частоте и с большой амплитудой. В 1-ом случае отклик системы выражается в появлении обертона, во 2-ом случае происходит скачок давления, и амплитуда колебаний в отклике системы превышает алгебраическую сумму амплитуд возмущения и исходных колебаний. Результаты сведены в таблицу 1, где $A_{алг} = A_0 + A_{воз}$ – алгебраическая сумма исходного колебания и возмущения, $A_{откл}$ – амплитуда колебаний в отклике системы, ω_0 – частота автоколебаний.

Таблица 1

$A_{воз}$	$\omega_{воз}$	$A_{алг}$	$A_{откл}$	$\omega_{откл}$	$\Delta A_{откл}$
0.001	ω_0	0.0084	0.0085	ω_0	0.0001
0.003	ω_0	0.0104	0.0107	ω_0	0.0003
0.005	ω_0	0.0164	0.0187	ω_0	0.0023
0.005	$2*\omega_0$	0.0164	0.0164	ω_0 с обертоном	0
0.05	ω_0	0.1064	Скачок 0.124/0.067	ω_0	0.0176
				ω_0	-0.0394
0.15	ω_0	0.3064	0.3381	ω_0	0.0317

При увеличении амплитуды возмущения, начиная с некоторого порога, происходит структурные изменения течения, наблюдается формирование циркуляционной зоны против часовой стрелки вблизи бака, интенсивность которой возрастает.

На рис.14 представлен график затухания амплитуды колебаний давления для чисел Маха набегающего потока 4 и 7, порожденных внесенным возмущением, после восстановления первоначального значения давления на левой границе. Для $M_\infty = 7$ частота возмущения бралась равной частоте автоколебаний $w = \omega_0(M)$, а также в полтора раза большей. Видно, что для $M_\infty = 7$ колебания затухают, а при числе Маха набегающего потока 4 вновь устанавливаются устойчивые колебания, что подтверждает аномальность этого режима.

Запуск сопла 2-ой ступени осуществляется ступенчатым повышением тяги. За несколько секунд тяга возрастает от 0 до 30% номинала тяги, после чего начинается отделение 1-ой ступени. При этом существенно меняются картина течения и характерные распределения газодинамических параметров, что наглядно иллюстрируется распределениями числа Маха на сферическом днище бака на рис.7 и 15.

На рис. 18 показана картина течения в плоскости $\varphi = 16,5^\circ$ близкой к плоскости II-IV непосредственно перед включением сопла 2-ой ступени.

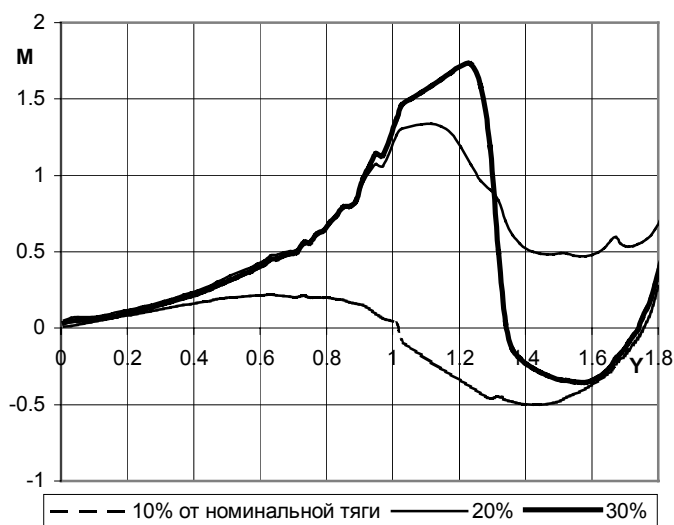


Рис. 15

На рис.16 представлены изолинии чисел Маха в плоскости I-III при включении сопла ДУ 2-ой ступени на 30% от номинальной тяги. Картина течения усложняется и становится нестационарной. Видно мощное циркуляционное течение выше сопла.

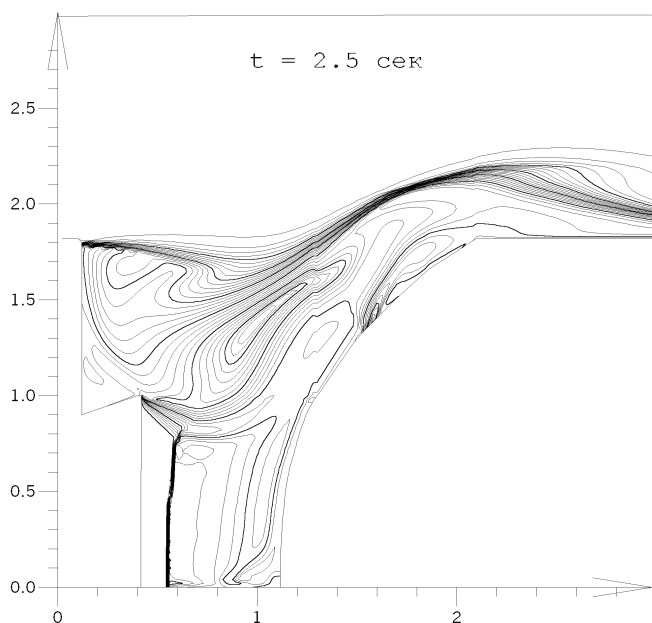


Рис. 16

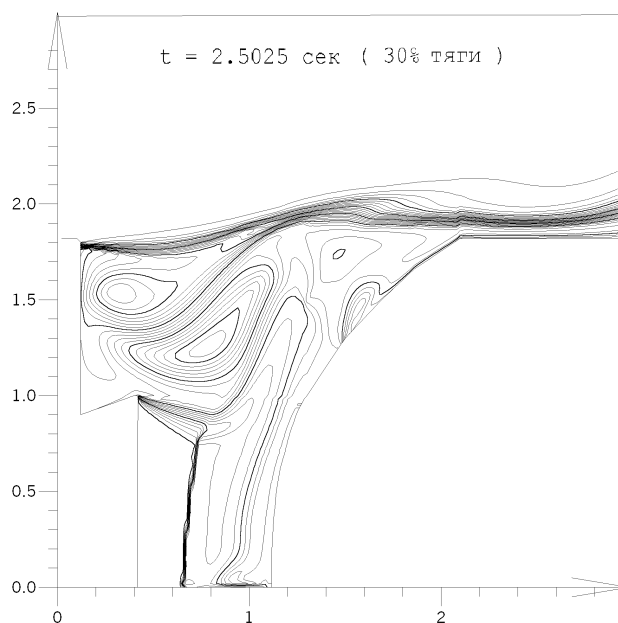


Рис. 17

Центральная циркуляционная зона значительно уменьшается в размерах и смещается к верхней части закругления бака, что видно из сравнения изолиний энтропийной функции на рис.2 и 17. При этом левая боковая циркуляционная зона увеличивается, разбивается на две, одна из которых более мощная направлена против часовой стрелки, а другая по часовой (см рис.17).

Ударная волна в струе, истекающей из сопла, совершает периодические колебания в направлении оси X (рис.16 и 17). Граница, разделяющая течение в межступенном отсеке и внешний поток, начиная с режима 20% тяги, совершает интенсивные колебания, сопровождающиеся мощными пульсирующими выбросами массы при фиксированном расходе продуктов сгорания через сопло. При переходе на режим 30% тяги амплитуда колебаний границы еще увеличивается, что видно для разных моментов времени на рис.16 и 17. Этот периодический процесс естественно должен приводить к пульсациям давления. На

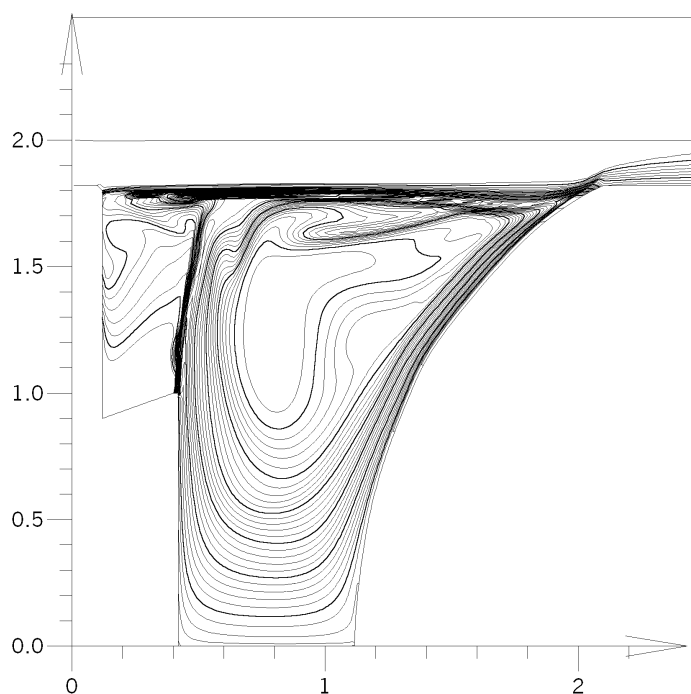


Рис. 18

рис. 19 представлено изменение давления при ступенчатом включении сопла второй ступени. Видно образование сильной осцилляции давления после повышения тяги сопла до 20% от номинала тяги, которое может привести к значительным пульсациям силовых нагрузок на отходящий центральный бак и незапланированным отклонениям в траектории отхода 1-ой ступени.

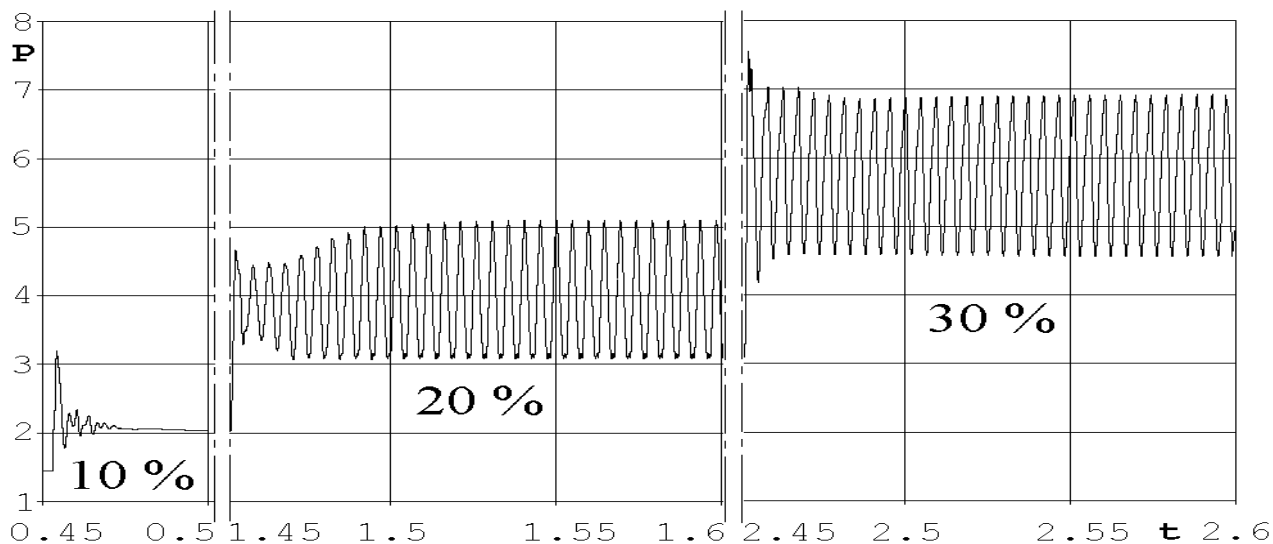


Рис. 19

4. Проведенное моделирование газодинамики межступенного отсека с характерной пространственной конфигурацией даёт представление о картине течения и ударно-волновых структурах на различных режимах полёта, включая этап разделения ступеней. Приведенные результаты позволяют прогнозировать экстремально теплонапряженные участки обшивки типового межступенного отсека. На одном из режимов полёта до включения сопла 2-ой ступени обнаружено anomальное появление автоколебаний давления, сопровождающееся структурной перестройкой течения. Такие anomальные автоколебания получены и для осесимметричной каверны, представляющей пространство между двумя близко расположенными соосными цилиндрами, обтекаемыми в продольном направлении стационарным потоком без внешних возмущений так, что это явление можно считать типичным для течений между соосными цилиндрами как с плоскими, так и неплюскими торцами. На этапе разделения ступеней при включённой ДУ обнаруженные автоколебания давления могут достигать значительной амплитуды соизмеримой со средним давлением в межступенном отсеке. Предложенный математический аппарат позволяет проигрывать внештатные ситуации в интересах обеспечения безопасности полёта типичной РН.

ЛИТЕРАТУРА:

1. С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976, 400 с.
2. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme, A second order sequel to Godunov's methods //J.Comput.Phys.1979. V. 32.1. P.101 – 136.