

УДК 533.6.011

© 1994 г. Е. В. МЫШЕНКОВ, В. И. МЫШЕНКОВ

РЕЖИМЫ ЛАМИНАРНОГО БОКОВОГО ОТРЫВА, ВЫЗВАННОГО ВЫХЛОПНОЙ СТРУЕЙ

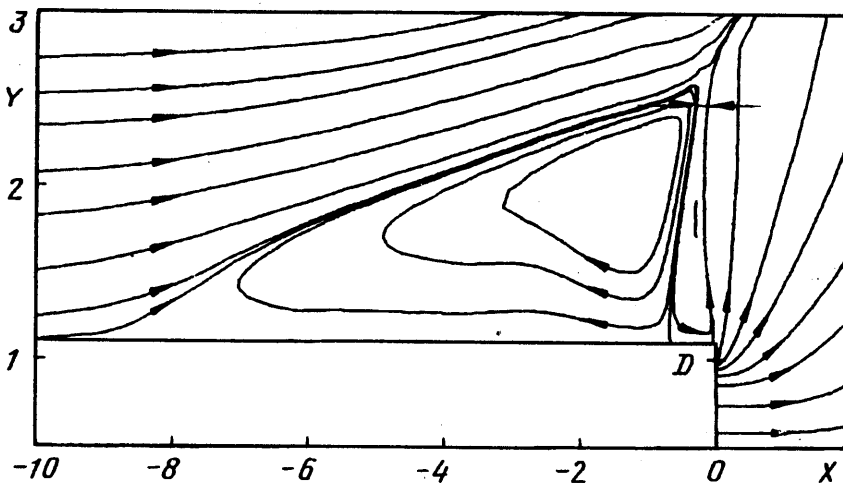
На основе численного решения полных уравнений Навье — Стокса проведено моделирование отрывного течения, возникающего на боковой поверхности летательного аппарата вследствие взаимодействия струи маршевого двигателя со спутным воздушным потоком. Обнаружено существование трех режимов отрывного течения: закрытого, открытого и периодического. Определены условия существования каждого из них.

При полете летательного аппарата на больших высотах в результате взаимодействия струи маршевого двигателя с обтекающим потоком воздуха на его боковой поверхности возникает область отрывного течения, увеличивающаяся с подъемом аппарата. Экспериментальными и теоретическими исследованиями этого явления [1—5 и др.] установлены зависимости газодинамических и геометрических характеристик отрывной области от определяющих параметров набегающего потока и струйного течения. Эти исследования выполнены в основном при небольших степенях нерасчетности струи маршевого двигателя n ($n = p_a/p_s$ — отношение давления на срезе сопла к давлению в набегающем потоке), для которых оказалось характерным образование отрывных областей закрытого (замкнутого) типа с дозвуковыми скоростями течения внутри (см. фиг. 1). Характер отрывного течения при больших степенях нерасчетности струи, т. е. при полетах летательных аппаратов на больших высотах, остался невыясненным.

Также недостаточно изучен вопрос о химическом составе газа, заполняющего отрывную область, т. е. вопрос о количестве газа струи, проникающего в отрывную зону. Правда, полученные ранее одним из авторов настоящей статьи численные решения уравнений Навье — Стокса для этого течения позволили на основе данных о распределении равновесной температуры высказать предположение о наличии в отрывной области при больших скоростях спутного потока значительного количества газа струйного течения. Хотя это предположение кажется вполне правдоподобным, для его обоснования не хватает фактических данных. Эти данные можно получить непосредственно из решения полной системы уравнений газовой динамики совместно с уравнением диффузии компонентов, рассматривая течение разнородных газов в струе и спутном потоке. Изучению именно этих вопросов посвящена настоящая работа.

1. Задача о взаимодействии обтекающего цилиндра потока с истекающей из его донного среза струей рассматривалась в рамках полных нестационарных уравнений Навье — Стокса, дополненных уравнениями диффузии компонент в аксиально-симметричной геометрии. Для интегрирования системы уравнений использовалась инвертированная схема Ошера [6], порядок аппроксимации которой повышен до второго посредством алгоритма ограничения потоков [7], а также схема расщепления [8]. Рассматривались только ламинарные течения газов.

Задача решалась в прямоугольной области меридионального сечения, ограниченной поверхностью тела, осью симметрии течения и поверхностями, достаточно далеко отстоящими от образующейся отрывной области, чтобы граничные



Фиг. 1

условия на них не оказывали существенного влияния на течение в области отрыва (фиг. 1). На наветренной границе расчетной области задавались параметры спутного потока с вязким пристеночным слоем вблизи боковой стенки с синусоидальным профилем скорости толщиной $0,2r_a$, где r_a — радиус среза сопла, взятый за характерный размер и отмеченный на фиг. 1—4 буквой D . На боковой и донной стенках задавались условия прилипания потока, на подветренной и верхней границах задавались условия гладкого сопряжения течения. На срезе сопла задавались параметры струи. Радиус цилиндра составлял $1,18r_a$.

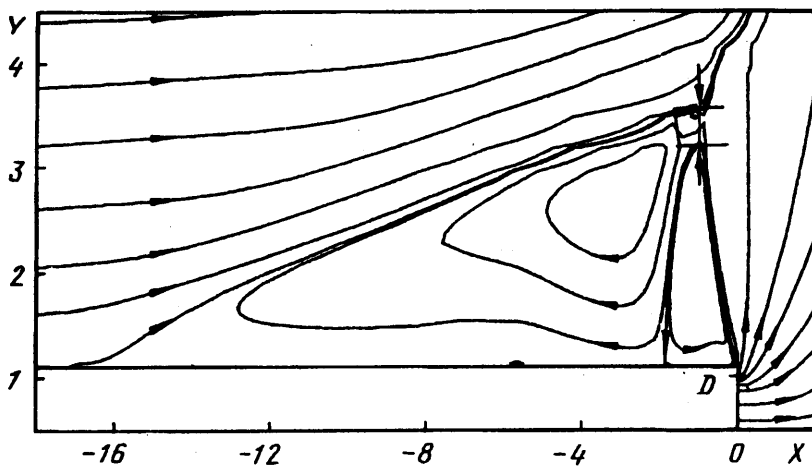
Газы спутного потока и струи считались совершенными с различными теплофизическими характеристиками: теплоемкостями при постоянном давлении $c_{ps} = 1,004$ кДж/(кг·град), $c_{pa} = 1,84$ кДж/(кг·град), показателями адиабаты $\gamma_s = 1,4$, $\gamma_a = 1,17$, статическими температурами $T_s = 256$ К, $T_a = 1880$ К.

Числа Маха спутного потока и струи принимались равными $M_s = 6$, 10 , $M_a = 3,8$. Нижние индексы s , a обозначают параметры спутного потока и струи на срезе сопла соответственно. Степень нерасчетности струи варьировалась в пределах $n = 10^2$ — 10^5 , число Рейнольдса по параметрам спутного потока задавалось равным $Re_s = 3300$.

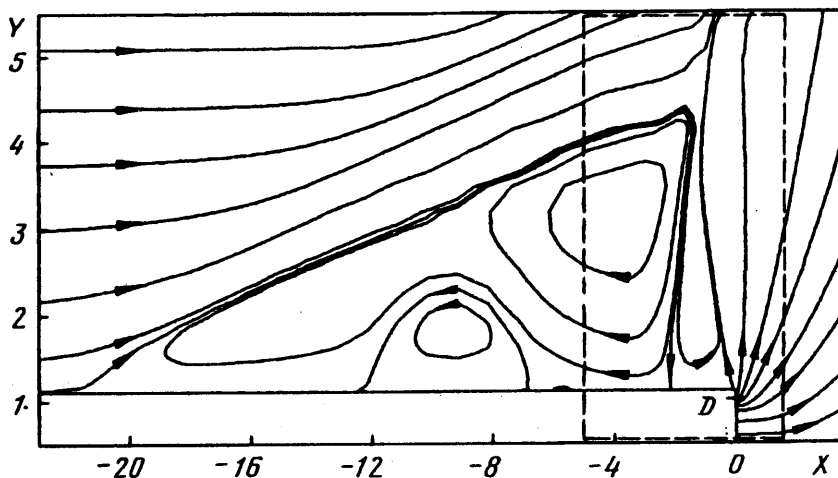
В качестве начальных данных в расчетной области использовались параметры течения, как моделирующие условия запуска двигателя, так и не моделирующие. Тем не менее через некоторое количество шагов по времени решения в обоих случаях получались одинаковыми. Большинство расчетов настоящей работы проведено с начальными данными, моделирующими условия запуска двигателя.

Расчеты проводились в областях размерами $(40r_a \times 16r_a)$, имеющих до 12 000 расчетных точек $(134 \times 109, 72 \times 62, 51 \times 51, 36 \times 31)$, на существенно неравномерных сетках с наибольшим сгущением у боковой поверхности тела и в окрестности его кормовой части, т. е. в областях наибольшего изменения параметров течения. С удалением от поверхности тела и среза сопла шаги сетки по обоим координатам равномерно увеличивались. Расчетные данные, полученные на различных сетках, согласуются между собой и с уменьшением шага сетки сходятся.

2. Расчеты продолжались до момента получения стационарного или периодического решения, что контролировалось наблюдением за изменением общей картины течения и параметров отрывной области. Решения, полученные обоими использованными методами (Ошера и расщепления) на различных сетках, дали совпадающие результаты. Большая часть результатов, представленных в настоящей работе, получена первым методом.



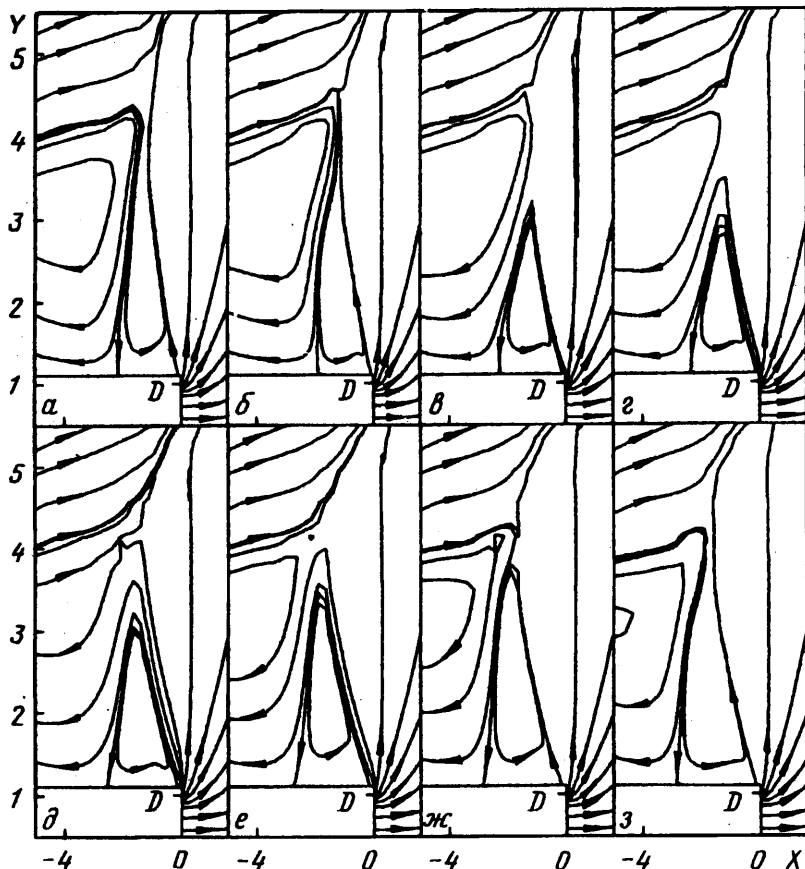
Фиг. 2



Фиг. 3

Изложим далее результаты, характеризующие сформировавшееся отрывное течение. Прежде всего отметим обнаруженное в результате проведенных расчетов существование при $M_1 = 6$, $M_2 = 3,8$ и различных степенях нерасчетности трех режимов отрывного течения у поверхности цилиндра: закрытого, открытого и периодического типов.

Отрывное течение закрытого типа существует при степенях нерасчетности $n \leq 10^3$ и характеризуется наличием двух-трех почти стационарных вихревых образований (вихрей) в отрывной области (передний, центральный и задний) с дозвуковыми скоростями. На фиг. 1 приведены линии тока, соответствующие $n = 10^3$, $M_1 = 6$, $M_2 = 3,8$. Центральный вихрь имеет минимальные размеры и в отдельных случаях может не наблюдаться. Наибольшие размеры имеет передний вихрь, занимающий до 90% всей отрывной области. При степенях нерасчетности $n \leq 10^3$ передний вихрь является чисто внутренним, закрытым, т. е. не имеет каналов конвективного обмена массой с внешним спутным или струйным течением. Задний вихрь существенно меньше и играет роль клапана, отделяющего передний вихрь от струйного течения и определяющего обмен газом между ними. Он имеет канал обмена массой со спутным потоком, т. е. является открытым. Однако скорости течения газа в горле канала, т. е. самом узком его сечении, отмеченном



Фиг. 4

на фиг. 1 стрелками, малы, а потому обмен газом заднего вихря со спутным потоком незначителен.

Давление в каждом поперечном сечении отрывной области (переднего вихря) практически постоянно. Внутри нее вдоль боковой стенки, как уже установлено ранее, располагается «полка» давления, т. е. область постоянного давления. Максимальные градиенты давления имеют место у правой границы заднего вихря и в окрестности точки отрыва.

Поступление газа струи в отрывную область закрытого типа, за исключением начального периода установления течения, происходит в основном за счет диффузии. Поскольку омываемая спутным потоком часть поверхности отрывной области много больше части поверхности, омываемой струйным течением, отрывная область заполняется в основном газом спутного потока, т. е. воздухом. В отрывных зонах закрытого типа в сравнении с отрывными зонами других типов средняя массовая концентрация газа струи минимальна и составляет около 0,15. Локальная концентрация газа струи максимальна в области соприкосновения отрывной зоны со струйным течением и у боковой поверхности и меняется от 0,7 до 0,3.

Отрывная область открытого типа образуется при дальнейшем увеличении степени нерасчетности струи и существует в узком ее диапазоне при $3 \cdot 10^3 < n < 7 \cdot 10^3$. Она характеризуется образованием двух вихревых зон: небольшой задней с замкнутым вихрем и большой передней с вихрем, открытым для газа струйного течения (см. фиг. 2, где приведены линии тока при $n =$

$= 5 \cdot 10^3$). В отдельных случаях появляется малый центральный вихрь, оказывающий слабое влияние на отрывное течение. Газ струйного течения попадает в переднюю отрывную зону через горло канала в верхней части отрывной области, отмеченное на фиг. 2 стрелками, и, пройдя вдоль всей ее поверхности, выходит из нее.

В результате такого формирования отрывной области средняя концентрация газа струи в ней оказывается наибольшей в сравнении с отрывными течениями других типов: закрытого и периодического, и составляет $c = 0,38$. Локальная концентрация газа струи максимальна у горла канала в отрывной зоне и в заднем вихре, где достигает величины $c = 0,85$. С удалением от кормовой части к точке отрыва потока концентрация газа струи в отрывной зоне уменьшается.

Скорости газа в области отрыва открытого типа больше скоростей газа в областях закрытого типа, но остаются еще дозвуковыми. Отрывное течение при этом является стационарным. Длина отрывной зоны более чем в 1,5 раза превышает длину отрывной области закрытого типа при $n = 10^3$.

Давление поперек отрывной области практически постоянно. Однако в продольном направлении «полка» давления сокращается, увеличиваются градиенты давления. Максимальные градиенты давления наблюдаются в области заднего вихря и у его правой границы.

С дальнейшим увеличением степени нерасчетности струи и возрастанием размеров области отрыва отрывное течение вновь перестраивается и становится течением периодического типа. Оно характеризуется образованием в отрывной области трех вихрей и попеременным открыванием и закрыванием (размыканием и замыканием) переднего и заднего вихрей (см. фиг. 3, 4, где приведены изолинии мгновенной функции тока). При этом размеры вихрей, общая длина отрывной области и газодинамические параметры в ней испытывают периодические изменения своих значений до 5—10%.

Пульсации переднего и заднего вихрей тесно взаимосвязаны, хотя на первый взгляд определяющим в режиме отрывного течения является задний вихрь, который регулирует поступление газа струи в переднюю отрывную зону. Так, увеличиваясь в поперечном направлении, задний вихрь сужает сечение канала, по которому подпитывается передняя отрывная зона газом струйного течения и выбрасывается некоторое количество газа переднего вихря, а затем полностью его перекрывает. Конвективный газообмен области отрыва со струйным течением прекращается и передняя отрывная зона становится закрытой. После этого задний вихрь раскрывается в своей верхней части и через образующийся канал в него начинает поступать газ спутного потока, а газ заднего вихря — выходит наружу (на фиг. 3 приведена картина течения при таком режиме). При этом подпитка переднего вихря газом спутного потока происходит только благодаря диффузии и взаимодействию слоев смешения.

Накопление массы газа в переднем вихре приводит к повышению в нем давления, вызывающего затем удлинение передней отрывной зоны и сокращение размеров заднего вихря. Наконец, в некоторый момент прерывается связь заднего вихря со спутным потоком и открывается канал обмена переднего вихря со струйным течением. Передняя отрывная зона становится открытой, из нее выбрасываются излишки скопившегося газа, что приводит к понижению в ней давления и сокращению длины отрывной зоны. Это сопровождается дальнейшим уменьшением размеров заднего вихря и расширением канала обмена переднего вихря со струйным течением. На фиг. 4, *a* — *г* приведены кадры последовательной перестройки течения от закрытой формы к открытой в задней части отрывной зоны, претерпевающей максимальные изменения с течением времени и отмеченной на фиг. 3 штриховой линией, в следующие моменты безразмерного времени: *a* — 193,4, *b* — 197,1, *c* — 206,4, *г* — 208,3.

Этот процесс продолжается до достижения некоторого минимального давления в передней отрывной зоне. После чего задний вихрь начинает вновь расти вследствие повышения в нем давления из-за притока газа из струйного течения и перекрывает канал связи переднего вихря со струйным потоком. Затем снова

открывается уже канал обмена заднего вихря со спутным потоком, а передний вихрь становится закрытым. На фиг. 4, δ — z приведены кадры обратной перестройки течения от открытой формы к закрытой в моменты времени: δ — 213,9, e — 217,6, $ж$ — 221,3, $з$ — 226,9. Эти кадры в обратном порядке качественно повторяют кадры фиг. 4, a — $г$.

Через некоторое время вновь открывается передний вихрь и закрывается задний. Процесс перестройки отрывного течения продолжается периодически с почти постоянной частотой, зависящей от объемов отрывных областей и связанной с акустическими колебаниями газа в отрывных зонах. С увеличением степени нерасчетности струи n и размеров отрывной области частота перестроек и колебаний газодинамических параметров в ней уменьшается таким образом, что число Струхала $St = l/(uT)$ (T — период перестройки течения, l — длина отрывной зоны, u — скорость струи на срезе сопла) остается неизменным, равным 0,42.

Длина отрывной зоны максимальна в периоды, когда передний вихрь закрывается, а задний открывается, и минимальна, когда передний вихрь открыт, а задний закрыт. Давление в отрывной зоне максимально при максимальных ее размерах.

Концентрация газа струи максимальна в заднем вихре и у боковой поверхности и достигает величин $c = 0,5$ — $0,6$. Перестройка режимов течения оказывает влияние на распределение и среднюю концентрацию газов в отрывной области. При открытом переднем вихре концентрация газа струи в задней части переднего вихря повышается, а при закрытом понижается, тогда как в области внутреннего вихря и ближе к точке отрыва остается практически неизменной. Это приводит к колебаниям средней концентрации в отрывной зоне с амплитудой в 3%. Средняя концентрация газов струи в отрывной зоне периодического типа больше средней концентрации газов струи в отрывной зоне закрытого типа и меньше, чем в отрывной зоне открытого типа, и составляет $c \approx 0,25$.

В отрывных областях периодического типа появляется область со сверхзвуковыми течениями с числом Маха, достигающим до $M = 1,4$. Она располагается между задним и средним вихрями и обусловлена большими градиентами давления. Сверхзвуковая зона возникает в моменты закрытия переднего вихря и пропадает при его открытии. При режиме с открытым передним вихрем течение в отрывной области дозвуковое с максимальными числами $M = 0,8$ — $0,95$.

Проведенные расчеты при $M_0 = 10$, $M_0 = 3,8$, $Re_0 = 3300$ подтвердили существование описанных выше режимов отрывного течения, причем границы диапазонов их существования смещены в сторону больших n .

Поскольку обтекание летательных аппаратов на больших высотах является чисто ламинарным, описанные режимы течения могут реализовываться при полетах летательных аппаратов на высотах выше 60 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carriere P., Sirieix M. Effects aerodynamiques de l'eclatement d'un jet de fusée//Rech. Aeronaut. 1962. № 89. P. 3—10.
2. Alpinieri L. J., Adams R. H. Flow separation due to jet pluming//AIAA Journal. 1966. V. 4. № 10. P. 1865—1866.
3. Adams R. H. Wind tunnel testing techniques for gas-particle flows in rocket exhaust plumes//AIAA Pap. 1966. № 767. 24 p.
4. Шлягуи А. Н. Взаимодействие сильнорасширенной сверхзвуковой струи со спутным сверхзвуковым и гиперзвуковым потоком//Уч. зап. ЦАГИ. 1979. Т. 10. № 3. С. 37—47.
5. Mace A. C. H., Markatos N. C., Spalding D. B., Tatchell D. G. Analysis of combustion in recirculating flow for rocket exhausts in supersonic streams//J. Spacecraft and Rockets. 1982. V. 19. № 6. P. 557—563.

6. *Engquist B., Osher S.* One-sided difference approximations for non-linear conservation laws//Math. Comput. 1981. V. 36. № 154. P. 321—351.
7. *Sweby P. K.* High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws//SIAM J. Numer. Anal. 1984. V. 21. № 5. P. 995—1011.
8. *Ковалев Б. Д., Мышенков В. И.* Расчет вязкой сверхзвуковой струи, истекающей в затопленное пространство//Уч. зап. ЦАГИ. 1978. Т. 9. № 2. С. 18.

Москва

Поступила в редакцию
22.X.1992