

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ОБТЕКАНИЯ КОРМОВОЙ ЧАСТИ И ТЕЧЕНИЯ ВНУТРИ СОПЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ИСТЕЧЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ

Р. К. ТАГИРОВ

(Москва)

Численному исследованию характеристик реактивных сопел в условиях полета, в том числе трансзвукового полета, посвящен ряд работ [1-4]. Рассматривается в основном истечение реактивной струи в спутный поток на режиме недорасширения. В работе [5] рассчитано истечение струи в спутный трансзвуковой поток на режиме перерасширения. При этом для получения решения использован метод установления и подвижная расчетная сетка. Однако в указанной работе не получены интегральные характеристики, не рассмотрены режимы с отрывом потока внутри сопла, для решения задачи требуется ЭВМ с относительно большой памятью (типа БЭСМ-6).

В данной работе численно исследовано совместное течение внешнего и внутреннего потоков, включая потоки в дозвуковой и сверхзвуковой частях сопла и в истекающей струе. Из-за отдельного рассмотрения потоков во внешней и внутренней областях возможно использование ЭВМ с относительно малой памятью (типа М-222). В работе численно исследовано также истечение струи из сопла, окруженного кольцевым эжекторным кожухом конечной длины, в спутный поток. Рассмотрение ограничивается плоским или осесимметричными потоками, газ считается идеальным, влияние вязкости учитывается в рамках модели пограничного слоя.

В результате численного исследования получено, что отрывная зона внутри сопла, возникающая на режиме перерасширения, исчезает либо при увеличении относительного полного давления внутренней струи, либо при увеличении скорости внешнего потока. При наличии эжекторного кожуха возникает сложная картина обтекания кормовой части сопла, рассчитанные распределения давления удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

1. Заданы контуры сопла и кормовой части. Выбирается прямоугольная система координат x, y , при этом ось x совмещается с осью симметрии. Выделяется поле течения для внешнего потока, ограниченное границей кормы и струи, левой и правой границами, а также верхней границей радиуса y_b . На верхней и правой границах задается постоянное статическое давление p_∞ , соответствующее числу M_∞ невозмущенного набегающего потока. На левой границе считаются заданными распределения полной энтальпии и энтропии, а также вертикальной составляющей скорости $v(y)=0$.

Выделяется поле течения и для внутреннего потока, ограниченное снизу стенкой центрального тела или осью симметрии, слева – начальным сечением, которое не обязательно должно совпадать с левым сечением внешнего потока, справа – концевым сечением, совпадающим с правым сечением внешнего потока, сверху – стенкой сопла и границей струи. Последняя является линией раздела внешнего и внутреннего потоков, она определяется в процессе решения задачи из условия равенства статических давлений и углов наклона векторов скорости внешнего и внутреннего потоков в каждой точке этой границы. На левой границе внутреннего потока задаются распределения полной энтальпии, энтропии и $v(y)=0$. На правой границе считается заданным постоянное статическое давление, равное p_∞ . В случае сверхзвуковой струи это условие не используется.

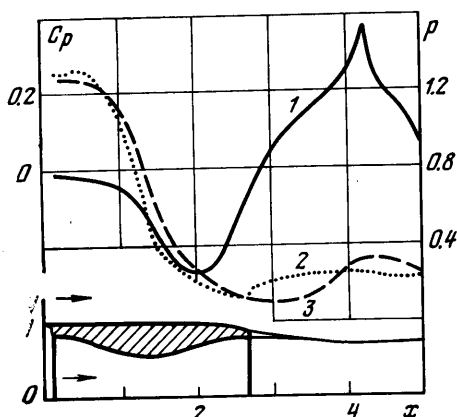
Для расчета течения во внешней и внутренней областях используется метод установления, конечно-разностная схема Годунова [6] и разработанные ранее алгоритмы [1, 7, 8]. Расчет проводится следующим образом. Вначале рассчитываются внутренний поток и струя, истекающая в среду с давлением p_∞ . Найденная граница струи рассматривается как нижняя граница внешнего потока. Проводится расчет внешнего потока и определяется распределение статического давления вдоль границы струи. Для этого распределения давления вновь проводится расчет внутреннего потока и т. д. Общее решение достигается в процессе итераций.

Можно исследовать дозвуковые, трансзвуковые и сверхзвуковые режимы полета и практически все важные режимы работы сопла, включая режимы перерасширения. Решение может искаться и в том случае, когда имеются небольшие зоны отрыва (высота отрывной зоны мала по сравнению с радиусом сопла). Отрывная зона может вызываться наличием уступа между концевыми кромками сопла и кормы, а также отрывом пограничного слоя со стенок сопла на режиме перерасширения. Для приближенного описания отрывного течения используются простые модели, предложенные в [1, 8]. Если в поле внешнего потока имеется кожух конечной длины, ох-

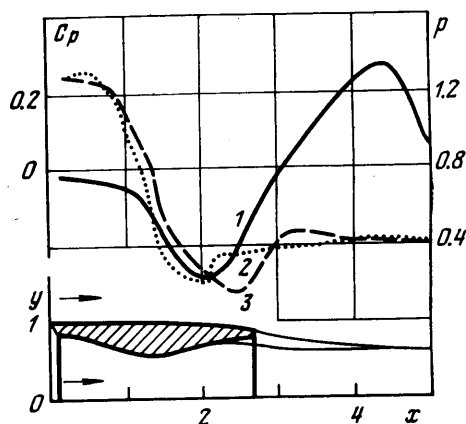
ватывающий кормовую часть, то в качестве граничного условия вдоль всей поверхности кожуха используется условие непротекания.

Перед проведением расчетов должны быть заданы следующие начальные данные: M_∞ — число M внешнего набегающего потока (скорость полета), γ и γ_1 — показатели адиабаты внешнего и внутреннего потоков соответственно, R_1/R_∞ — отношение газовых постоянных внутреннего и внешнего потоков, $\pi_1 = p_1^*/p_\infty$ — отношение полного давления внутреннего потока к p_∞ , T_1^*/T_∞^* — отношение полных температур двух потоков. В приведенных ниже примерах расчета было принято: $\gamma = \gamma_1 = 1.4$, $R_1/R_\infty = T_1^*/T_\infty^* = 1$. Расчеты проводились на ЭВМ М-222.

2. Был проведен расчет обтекания кормовой части, образующая которой описывалась дугой окружности радиуса 8 (все линейные размеры относятся к максимальному радиусу кормовой части y_m). Внутри кормовой части находилось сопло



Фиг. 1



Фиг. 2

Лавала, рассмотренное в [8] и имеющее следующие основные размеры: радиус входного сечения $y_0 = 0.83$, радиус кривизны стенки в области критического сечения 1.25, радиус критического сечения 0.566, радиус выходного сечения 0.79, угол наклона стенки дозвуковой части 20° , угол наклона стенки сверхзвуковой части 10° . Между кромками сопла и кормы имелся донный уступ высотой 0.09.

Для внешнего потока была выбрана расчетная сетка 30×10 , для внутреннего потока — также 30×10 и проведен расчет течения при $M_\infty = 0.9$, $y_b = 5$ и $\pi_1 = 6.3$. Совместное решение для внешнего и внутреннего потоков было получено после трех итераций. Решение задачи в каждой итерации ведется до достижения неравенства $\max \Delta p(50) < \epsilon$, где $\max \Delta p(50)$ — максимальное относительное различие давлений, сравниваемых вдоль стенки сопла или кормы через 50 временных слоев, ϵ — допустимая погрешность установления. Для сокращения времени счета при проведении итераций расчеты проводились до различных степеней установления ϵ . В первой итерации расчеты внутреннего и внешнего потоков проводились до достижения $\epsilon = 0.013$, при этом потребовалось 4 час времени ЭВМ М-222. Во второй итерации расчеты внутреннего и внешнего потоков проводились до $\epsilon = 0.005$ и потребное время составило ~ 1.5 час. В третьей итерации расчеты велись до $\epsilon = 0.001$ и потребное время составило также ~ 1.5 час.

Форма исследуемого тела и результаты расчета показаны на фиг. 1. В нижней части графика приведены границы струи и отрывной зоны за уступом, в верхней части — распределение коэффициента давления $C_p = (p - p_\infty) / 0.5 \gamma p_\infty M_\infty^2$ вдоль поверхности кормы и струи (линия 1), распределения давлений p вдоль оси симметрии (линия 2) и вдоль стенки сопла и границы струи (линия 3). Давление p обезразмерно отнесением к критическому скоростному напору внутреннего потока. Видно наличие скачка уплотнения у выходной кромки сопла (режим перерасширения).

В результате проведенных расчетов были найдены также интегральные характеристики рассматриваемого выходного устройства: коэффициент волнового сопротивления кормы $C_{wb} = 0.048$, коэффициент донного сопротивления уступа $C_{zg} = 0.011$, коэффициенты расхода и тяги сопла $\mu = 0.997$ и $R = 0.963$. Соотношения для определения $\mu = m_c/m_i$ и $R = R_c/R_i$, где m_c и R_c — расход и тяга сопла, m_i и R_i — расход и тяга идеального сопла [7, 8].

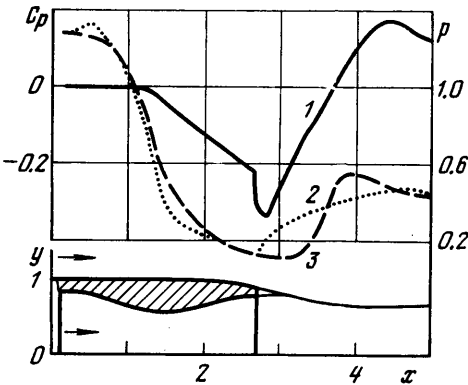
Следует отметить, что найденные значения μ и R удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями $\mu = 0.993$, $R = 0.96$ [8]. Расчет коэффициента

эффективной тяги сопла (внутренняя тяга минус сопротивление кормы) проводился по соотношению

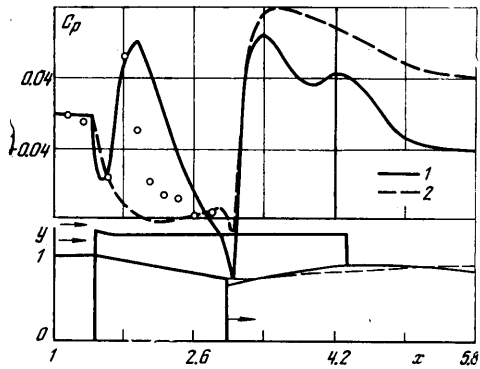
$$R_e = R - \frac{C_x}{2} \frac{\gamma}{\gamma_1} \left(\frac{\gamma_1 + 1}{2} \right)^{(\gamma_1 - 1)/\gamma_1} \frac{M_\infty^2 (y_m/y_0)^2}{\pi_1 R_i}$$

Здесь R_i — идеальная тяга сопла, отнесенная к произведению критического скоростного напора внутреннего потока на площадь входного сечения сопла. С учетом $C_x = C_{xb} + C_{xg} = 0.059$, $y_m/y_0 = 1.2$, $R_i = 0.726$ определено $R_e = 0.95$.

Далее были рассчитаны потоки для исследуемой модели при уменьшенном значении $\pi_1 = 3.52$. Результаты расчета после третьей итерации показаны на фиг. 2 (обозначения те же, что и на фиг. 1). Видно, что в этом случае возникает отрыв потока внутри сопла, работающего на режиме перерасширения. В результате расчета



Фиг. 3



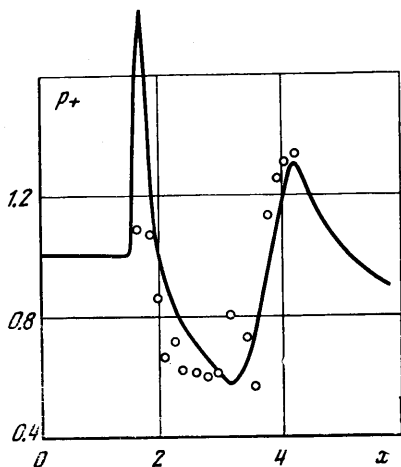
Фиг. 4

получены также $C_{xb} = 0.054$, $C_{xg} = 0.019$, $\mu = 0.997$, $R = 0.91$, $R_e = 0.87$. Следует отметить, что C_{xg} учитывает только силы, действующие на кольцевой уступ. Потери тяги, связанные с отрывом потока внутри сопла, включены в коэффициент тяги R .

Если теперь сохранить то же значение $\pi_1 = 3.52$, а число M_∞ увеличить до значения $M_\infty = 1.3$, то картина течения изменяется. В этом случае, как показывают результаты расчета на фиг. 3, отрыв потока внутри сопла не возникает из-за наличия местного понижения давления во внешнем потоке. Были найдены также $C_{xb} = 0.036$, $C_{xg} = 0.047$, $\mu = 0.997$, $R = 0.878$, $R_e = 0.795$. При $M_\infty < 1$ граница отрывной зоны со стороны внешнего потока строилась в соответствии с работой [1], она плавно примыкала к корме и к струе. При $M_\infty = 1.3$ эта модель была несколько изменена, поскольку при сверхзвуковой скорости угол наклона границы отрыва не совпадает с наклоном тела. Поэтому для местного сверхзвукового числа $M = 1.6$ перед уступом со стороны внешнего потока была принята как для плоского уступа относительная величина донного давления $p_g/p = 0.45$ [9]. Соответствующий угол наклона границы отрывной зоны по соотношению Прандтля — Майера относительно касательной к телу оказался равным 15° . Этот угол и был использован при приближенном построении границы отрывной зоны в примере расчета с $M_\infty = 1.3$.

Рассмотренные примеры получены без учета влияния пограничных слоев, нарастающих вдоль стенок сопла и кормы. При необходимости учета этого влияния следует провести расчеты пограничных слоев для внешнего и внутреннего потоков в соответствии с работами [1, 8]. Затем, поправив контуры кормы, струи и сопла на толщины вытеснения, следует повторить расчеты внешнего и внутреннего потоков по отдельности.

3. Проведен расчет обтекания конической кормовой части с углом наклона стенки 10° при наличии кольцевого кожуха с радиусом 1.24. Формы кормы и кожуха, построенные в соответствии с данными работы [10], показаны на фиг. 4. Поскольку реактивная струя истекала из плавного сужающегося сопла, установленного внутри кормовой части, то расчет внутреннего потока (струи) проводился от выходного сечения сопла, где было принято число Маха $M = 1$. Между концевыми кромками кормы и сопла имелся кольцевой донный уступ с высотой 0.1. Для приближенного



Фиг. 5

нительно мало расчетных ячеек и была использована приближенная модель для описания отрывной зоны за уступом.

Расчитанное распределение давления $p_+ = p/p_\infty$ вдоль внутренней поверхности кожуха приведено на фиг. 5. При этом слева ($x < 1.5$) и справа ($x > 4.35$) от кожуха распределения давления даны вдоль соответствующих цилиндрических поверхностей в поле внешнего потока. На этом же графике приведены экспериментальные точки работы [10]. Здесь также в общем наблюдается удовлетворительное соответствие. В результате расчета были найдены для кормы $C_{xh} = 0.012$, $C_{xg} = 0.027$, $C_x = C_{xh} + C_{xg} = 0.039$. Экспериментальное значение $C_x = 0.048$. Отличие объясняется расхождением соответствующих распределений давления на фиг. 4.

Для выявления влияния кожуха на параметры течения был проведен расчет обтекания той же кормы при отсутствии кожуха. Полученные результаты показаны на фиг. 4 (линии 2). Видно, что наличие кожуха сильно изменяет распределение давления вдоль поверхности кормы, соответственно изменяется и коэффициент сопротивления кормы: с кожухом $C_x = 0.039$, без кожуха $C_x = 0.066$. Однако при этом следует отметить, что кожух обладает своим волновым сопротивлением, равным по расчету $C_{xh} = 0.09$. Таким образом, при $\lambda_1 = 6$ суммарное сопротивление кормы с кожухом больше сопротивления кормы без кожуха. С увеличением λ_1 сопротивление кормы с кожухом будет уменьшаться и, как показывают экспериментальные исследования [10], начиная с $\lambda_1 = 11$ сопротивление кормы с кожухом становится меньше сопротивления кормы без кожуха.

Поступила 25 X 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Тагиров Р. К. Транзвуковое обтекание тела вращения при истечении реактивной струи из его кормовой части. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 2.
2. Stow P. The interaction of a sonic jet with a surrounding subsonic stream. Aeronaut. Quart., 1974, vol. 25, No. 3.
3. Grossman B., Melnik R. E. The numerical computation of the transonic flow over after-bodies including the effect of jet-plume and viscous interactions. AIAA paper, 1975, No. 62.
4. Putman Laurence E., Abeyounis William K. Experimental und theoretical study of flow fields surrounding boattail nozzles at subsonic speeds. AIAA paper, 1976, No. 675.
5. Курочкина Н. Я., Тагиров Р. К. К расчету сверхзвуковой перерасширенной струи идеального газа, истекающей в спутный транзвуковой поток. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, № 4.
6. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М., «Наука», 1976.
7. Тагиров Р. К. Теоретическое исследование течения идеального газа в сужающихся соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 6.