

3. Гупало Ю. П., Рязанцев Ю. С. О стационарных режимах работы проточного адиабатического химического реактора.— ПМТФ, 1967, № 5, с. 37–44.
4. Арис Р. Анализ процессов в химических реакторах. М.: Химия, 1967. 328 с.
5. Перлмуттер Д. Устойчивость химических реакторов. Л.: Химия, 1976. 256 с.
6. Эмануэль Н. М., Кнорре Д. Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1974. 400 с.
7. Matsuura T., Kato M. Concentration stability of the isothermal reactor.— Chem. Eng. Sci., 1967, v. 22, № 2, p. 171–183.
8. Люк Ю. Специальные математические функции и их аппроксимации. М.: Мир, 1980. 608 с.

Москва

Поступила в редакцию
2.II.1982

УДК 533.6.011.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЙ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ С ПРЕГРАДАМИ

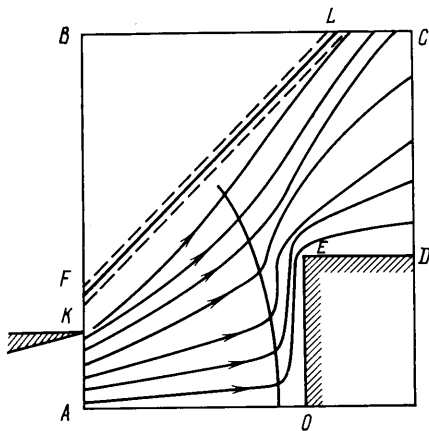
ГОЛОМАЗОВ М. М., ДАВЫДОВ Ю. М., ЕЖКОВ В. В.,
ШМАТОВ С. И.

При натекании сверхзвуковой нерасчетной струи на преграду в областях, прилегающих к преграде, формируется поток сложной структуры с разветвленной системой скачков уплотнения, содержащий области местного дозвукового течения, контактные разрывы и области с большими градиентами параметров. Это обстоятельство сильно затрудняет как экспериментальное исследование таких течений, так и численные расчеты с предварительным выделением разрывов. В связи с этим особое значение приобретают здесь численные методы сквозного счета, позволяющие проводить расчеты без априорной информации о структуре потока и получать достаточно подробную информацию об особенностях течения. В [1] приведены предварительные результаты численных экспериментов, моделирующих истечение струи идеального газа в область сложной геометрической формы.

В данной работе приводятся постановка и результаты численного решения задачи о взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с преградами, установленными перпендикулярно оси струи. Выявлено влияние определяющих параметров, таких, как геометрия преграды, расстояние преграды от среза сопла и т. д., на характер течения вблизи преграды. Расчеты проводились по методу крупных частиц Белоцерковского — Давыдова [2]. В этом методе используется идея расщепления по физическим факторам [3, 4], позволяющая построить сравнительно простой и экономичный алгоритм. С помощью метода крупных частиц можно получать характеристики нестационарных течений, а также в результате установления их стационарные значения. Свойство аппроксимационной вязкости, присущее разностной схеме метода, позволяет проводить расчет по единому алгоритму как в области гладких течений, так и на разрывах.

Перейдем к описанию постановки задачи. Картина течения при взаимодействии определяется числом M_a , нерасчетностью струи $n = p_a / p_H$, углом полураствора сопла θ_a , относительным радиусом преграды r_w / r_a и относительным расстоянием преграды от среза сопла $x_w' = x_w / r_a$ (индексом a отмечены величины, относящиеся к срезу сопла, индексом w — к преграде, индекс H соответствует параметрам окружающей среды). В качестве начальных условий в момент времени $t=0$ используются параметры невозмущенного потока, т. е. ρ_H, E_H, u_H, v_H (E — удельная полная энергия, $E = \epsilon + \frac{1}{2} |V|^2$).

Рассматривая задачу как осесимметричную, будем полагать, что преграда не нарушает осевой симметрии течения. Поэтому на оси AO ставятся обычные условия симметрии (фиг. 1). На преграде OED ставятся условия непротекания. На срезе конического сопла AK параметры потока ρ_a, E_a, u_a, v_a считаются равными параметрам потока от соответствующего конического сверхзвукового источника и в течение всего процесса решения поддерживаются постоянными. Поскольку струя втекает в затопленное пространство, постановка граничных условий на участке $FBCD$ должна быть выполнена так, чтобы, во-первых, течение все время «чувствовало» наличие окружающей газовой среды и, во-вторых, чтобы на определенных участках внешней

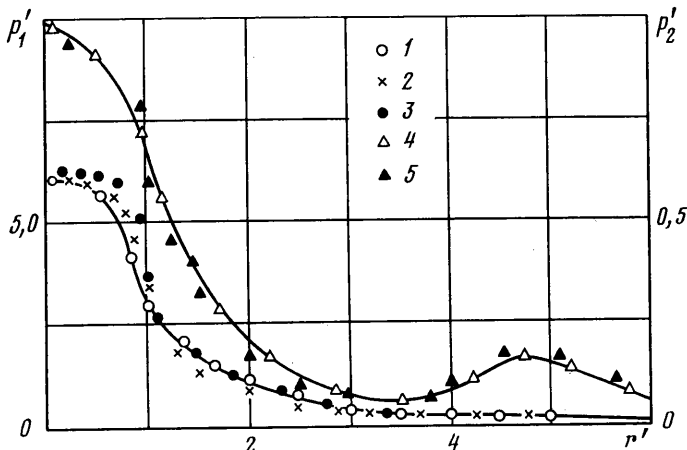


Фиг. 1

совпадает с течением в свободной струе при тех же параметрах на срезе сопла. Поэтому на основании приближенных формул можно с некоторой точностью определить форму границы струи на этом участке. Затем точка L выбирается так, чтобы угол BLF был немного больше начального угла наклона этой приближенной границы струи. После этого условия на внешних границах ставятся следующими образом: на участке FL условия невозмущенной внешней среды; на участке LC — экстраполяция изнутри, так как течение в окрестности CD всегда сверхзвуковое и возмущения «сносятся» потоком.

границы газ имел возможность свободно «вытекать» из расчетной области. Исходя из подобных соображений и учитывая параметры на срезе (M_a , n , θ_a), а также геометрию системы сопло — преграда (r_a , r_w/r_a , $x_w' = x_w/r_a$), выбираются граничные условия на внешней границе для каждого конкретного варианта. Так, для варианта с параметрами сопла $M_a = 2,52$, $n = 15$, $\theta_a = 7^\circ 15'$ и бесконечной плоской преградой ($r_w/r_a \gg 1$), находящейся на расстоянии $x_w' = 1,84$ от среза, на участке FB брались условия невозмущенной внешней среды, которые поддерживались все время постоянными, на участке BC использовалась экстраполяция «изнутри» и на самой преграде — условия непротекания.

В случае же конечной преграды прежде всего деформировалась расчетная область (из рассмотрения исключался треугольник FBL), в результате чего внешняя граница определялась ломаной $FLCD$. Это связано с тем, что вплоть до системы скачков уплотнения перед преградой поток

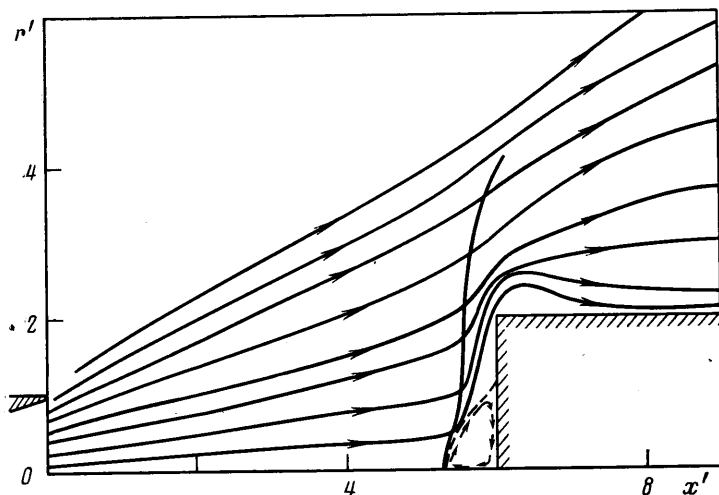


Фиг. 2

Рассмотрим некоторые результаты проведенных расчетов. На фиг. 2 приводится распределение давления ($p_1'(r')$) вдоль бесконечной плоской преграды ($r_w/r_a \gg 1$) для варианта $M_a = 2,52$, $n = 15$, $\theta_a = 7^\circ 15'$, $x_w' = 1,84$, где $p_1'(r') = p_1(r')/p_a$ — давление на преграде, отнесенное к статическому давлению на срезе сопла, $r' = r/r_a$ — радиус, отнесенный к радиусу среза сопла. Здесь точки 1 соответствуют данным, полученным методом крупных частиц, точки 2 — результатам расчета по методу Годунова [6], точки 3 — результатам эксперимента из работы [5]. Из графика видно, что результаты, полученные методом крупных частиц, удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента и метода Годунова. Следует отметить также, что расчет по методу Годунова проводился с выделением границы струи и областей взаимодействия струи с преградой.

На этой же фигуре приводится еще одно сравнение распределения давления $p_2'(r')$ вдоль бесконечной плоской преграды с экспериментом [7] при следующих определяющих параметрах: $M_a=2,0$; $n=2,85$; $\theta_a=5^\circ$, $x_w'=2,0$. Здесь $p_2'(r')=p_2(r')/p_0$ — давление на преграде, отнесенное к давлению торможения за скачком. Точки 4 отвечают результатам расчета по методу крупных частиц, точки 5 — экспериментальным данным [7]. Из фиг. 2 следует, что имеет место удовлетворительное согласование расчета с экспериментом.

Таким образом, представленные сравнения расчетных и экспериментальных данных показывают целесообразность применения метода крупных частиц к расчету струйных течений.



Фиг. 3

Рассмотрим теперь результаты расчетов взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с конечной преградой (цилиндрическим торцом). Торцев помещается в пределах первой бочки струи, при этом диаметр торца меньше поперечного размера струи. На фиг. 3 дана физическая картина течения для варианта $M_a=1,5$; $n=16,14$; $\theta_a=5^\circ$, $r_w/r_a=2,0$; $x_w'=6,0$. В результате взаимодействия перед торцом образуется скачок уплотнения, аналогичный отошедшему скачку перед торцом, обтекаемым сверхзвуковым потоком. Но наличие центральной срывной зоны вызывает образование эффективного тела, контур которого вызывает появление перегиба ударной волны.

Возникновение зоны отрывного течения связано с периферийным максимумом в распределении давления $p'(r')$ по лобовой поверхности торца (фиг. 4 — штриховая линия). Газ, прошедший через центральный скачок и имеющий давление торможения меньше максимального давления p_+ , не может покинуть центральную область. Вблизи оси газ течет навстречу потоку со скоростью, соответствующей числу $M \approx 0,15$.

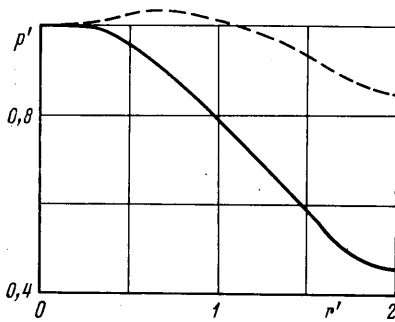
В [7] на основе экспериментальных данных отмечалось наличие аналогичной центральной срывной зоны в ударном слое при натекании сверхзвуковой недорасширенной струи на бесконечную плоскую преграду. Для выяснения причины появления периферийного максимума в распределении давления был проведен ряд расчетов с другими значениями определяющих параметров. Расчеты вариантов $M_a=1,5$; $n=16,14$; $\theta_a=5^\circ$; $r_w/r_a=2,0$; $x_w'=7,0$; $9,0$ и $M_a=2,0$; $n=16,14$; $\theta_a=5^\circ$; $r_w/r_a=2,0$; $x_w'=6,0$ дали аналогичную картину течения. В случае же $M_a=1,5$; $n=16,14$; $\theta_a=5^\circ$; $r_w/r_a=2,0$; $x_w'=3,0$ центральной вихревой зоны обнаружено не было (фиг. 1) и максимум распределения давления $p'(r')$ по лобовой поверхности торца находился на оси симметрии (фиг. 4 — сплошная линия).

Таким образом, центральная срывная зона возникает, начиная с некоторого x_w^* . Рассмотрение зависимостей p' от расстояния r' от оси симметрии вдоль лучей $x'=\text{const}$ показало, что периферийный максимум давления имеет место и в самой струе до центрального скачка, причем зона течения с таким распределением $p'(r')$ начинается с некоторого $x_w^* > 3,0$. Анализ результатов, представленных в [8], показал, что как в свободно расширяющихся, так и в затопленных струях может иметь место явление периферийного максимума в распределении давления вдоль лучей $x'=\text{const}$, при этом зона с таким аномальным распределением $p'(r')$ обычно распо-

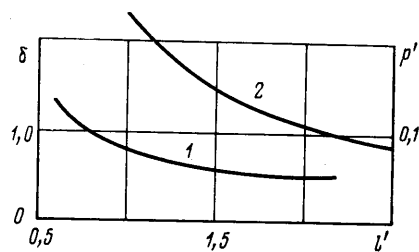
лагается в районе середины первой бочки для затопленных струй. Последнее обстоятельство тоже согласуется с результатами представленных здесь расчетов. Действительно, согласно [8], длина первой бочки $l \approx 2r_a 0,7 M_a \sqrt{\kappa n} = 10,2$. При $x_w' > 0,5l$ результаты расчетов показывают наличие периферийного максимума в струе, а при $x_w' < 0,5l$ — его отсутствие.

Таким образом, полученные результаты численных расчетов позволяют предположить, что причиной возникновения центральной вихревой зоны является наличие в свободной струе области течения с периферийным максимумом в распределении давления вдоль лучей $x' = \text{const}$.

В [1] была представлена физическая картина истечения струи в трубу, в конце которой на различных расстояниях располагалась бесконечная плоская преграда.



Фиг. 4



Фиг. 5

Наличие стенок трубы обусловило появление скачка малой интенсивности в дополнение к структуре ударных волн, возникающей при взаимодействии струи с плоской преградой. Положение головного скачка зависит от ряда факторов. На фиг. 5 приводится зависимость величины отхода δ головного скачка от величины зазора l' между плоской преградой и концом трубы (кривая 1). Характер зависимости показывает, что при $l' < 1,1$ головной скачок быстро приближается к срезу сопла, что вызывается возрастанием давления внутри трубы, и при $l' < 0,4$ происходит запирание течения. На этой же фигуре представлено изменение давления p' на стенке в окрестности среза сопла в зависимости от величины l' зазора. Это поведение характерно для всех точек внутри трубы, находящихся за пределами границы струи. Расчеты проведены для случая $M_a = 5,5$, $\kappa = 1,3$, $n = 8,0$.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии геометрических параметров системы сопло — преграда на особенности течения в области взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голомазов М. М., Ежков В. В. О взаимодействии затопленных струй с преградой. — Изв. АН СССР, МЖГ, 1979, № 5, с. 152.
2. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Нестационарный метод «крупных частиц» для газодинамических расчетов. — Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1971, т. 11, № 1, с. 182.
3. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. Новосибирск: Наука, 1977. 352 с.
4. Давыдов Ю. М. Многопараметрические схемы расщепления для решения пространственно-трехмерных нестационарных задач. — Докл. АН СССР, 1979, т. 247, № 6, с. 1346.
5. Мельникова М. Ф., Нестеров Ю. Н. Воздействие сверхзвуковой нерасчетной струи на плоскую преграду, перпендикулярную оси струи. — Уч. зап. ЦАГИ, 1971, т. 2, № 5, с. 105.
6. Дубинская Н. В., Иванов М. Я. К расчету взаимодействия сверхзвуковой струи идеального газа с плоской преградой, перпендикулярной ее оси. — Уч. зап. ЦАГИ, 1975, т. 6, № 5, с. 38.
7. Губанова О. И., Лунев В. В., Пластинина Л. И. О центральной срывной зоне при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с преградой. — Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 2, с. 135.
8. Аверенкова Г. И., Ашратов Э. А., Волконская Т. Г. и др. Сверхзвуковые струи идеального газа. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970, ч. 1. 279 с.; 1971, ч. 2. 170 с.