

УДК 533.6.011

© 1995 г. С. В. ЯГУДИН

О ТЕЧЕНИИ НЕВЯЗКОГО ГАЗА В СОПЛЕ С ИЗЛОМОМ КОНТУРА ПЕРЕД МИНИМАЛЬНЫМ СЕЧЕНИЕМ

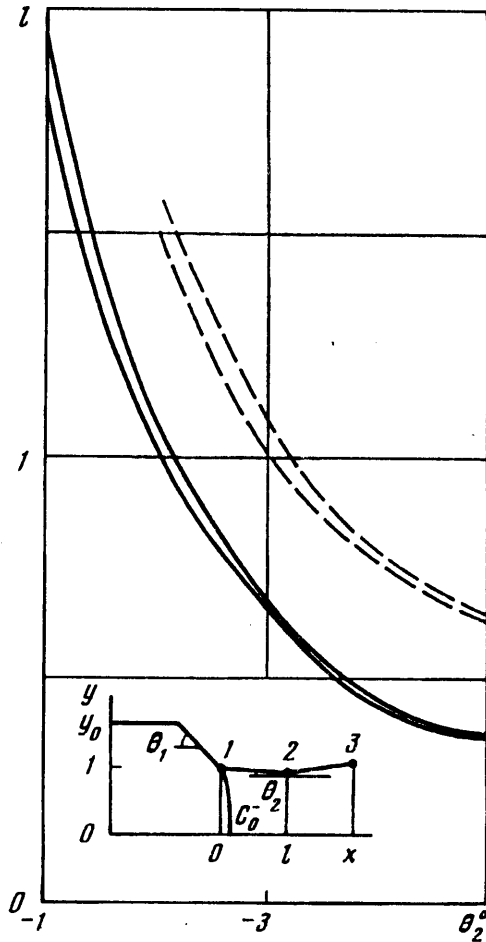
Дано объяснение двух возможных режимов течения идеального газа в сопле с контуром перед минимальным сечением в виде выпуклого угла: с запираем течения в сечении, проходящем через вершину угла, и в минимальном сечении. Для подтверждения приведены результаты численных расчетов методом установления с использованием конечноразностной схемы Годунова — Колгана.

Контуры сопел силовых установок обычно состоят из нескольких прямолинейных участков. При регулировании положений створок сопел возможны ситуации, когда угол между двумя створками перед минимальным сечением является выпуклым в сторону потока (контур сужающейся части имеет угловую точку, или излом). Согласно одномерной теории, течение в сопле является дозвуковым вплоть до прямолинейной звуковой линии в минимальном сечении. Двумерность течения, как известно [1, 2], приводит к искривлению звуковой линии. В основном она смещается за минимальное сечение и лишь незначительная ее часть в пристеночной области располагается перед ним. Но оказывается, что обтекание излома или сильно искривленного выпуклого внутрь участка контура перед минимальным сечением может приводить к существенным изменениям течения.

На это обстоятельство, по-видимому, впервые было обращено внимание в [3] при анализе результатов испытаний осесимметричного сужающегося-расширяющегося сопла с прямолинейными створками. Результаты измерений расхода свидетельствовали о том, что при отклонении сверхзвуковой створки вниз, в некоторое положение ниже горизонтального, при котором получается биконическое сужающееся сопло, происходит существенное изменение режима течения.

Для объяснения этого изменения в [3] проводились численные исследования сверхзвукового течения невязкого газа методом характеристик. Течение рассчитывалось вниз по потоку от предельной характеристики C_0^- второго семейства, соответствующей автомодельному (запертому) течению в коническом сопле с углом сужения контура $\theta_1 = -50^\circ$ (фиг. 1). Данные на характеристике были получены методом годографа. Из-за известных ограничений метода характеристик структура течения между характеристикой C_0^- и сечением 2 не была определена, удалось рассчитать течение лишь в небольшой области с числами $M > 1$ около излома. На основании этих расчетов было сделано предположение о том, что скачок уплотнения, выходящий из излома, при угле сужения сверхзвуковой створки -5° может попасть на звуковую линию, что вызовет ее разрушение и изменение режима течения.

В этом объяснении не учитывается то, что при отклонении створки ниже горизонтального положения уменьшается площадь минимального сечения сопла — параметр, являющийся, как известно, определяющим во внутренних течениях. Ниже предлагается другое объяснение изменения режима течения в сопле с изломом контура перед минимальным сечением и для подтверждения его приведены результаты численных расчетов.



Фиг. 1

1. Исследуется течение в сопле, контур которого показан на фиг. 1. Цифрами 1—3 обозначены концевые точки створок, а также сечения, проходящие через них. Пусть сопло состоит лишь из одной первой створки с углом сужения θ_1 . Известно (например, [2]), что запертый режим течения в таком сопле наступает при уменьшении внешнего давления (при фиксированных полных параметрах на входе) до значения, называемого «вторым критическим», при котором вектор скорости в точке 1 поворачивается на угол $|\theta_1|/2$ в плоском сопле или близкий к этому значению — в осесимметричном. На запертом режиме расход газа через сопло с площадью выходного сечения F_1 максимальный и равен $G_1 = \rho_* u_* \mu_1 F_1$ (ρ_* , u_* — критические плотность и скорость, μ_1 — коэффициент расхода).

Рассмотрим теперь исходный контур (фиг. 1), но с таким углом сужения второй створки $|\theta_2| \ll |\theta_1|/2$, что звуковая линия, выходящая из точки 1, остается такой же, как и в случае сопла с одной створкой. При обтекании излома из точки 1 выходит скачок уплотнения [3, 4]. Волны сжатия, идущие от начального участка контура за точкой 1, приводят к торможению потока. Течение между сечениями 1 и 2 зависит как от интенсивности возмущений, обусловленных обтеканием точки 1, так и от расстояния l между этими сечениями, и может иметь достаточно сложную структуру в результате отражения возмущений от верхней и нижней границ течения.

Из условия запертия течения в сечении 1 следует, что расход газа через

сопло фиксирован и равен G_1 . Очевидно, что при увеличении l площадь F_2 сечения 2 может уменьшиться настолько, что расход газа G_1 через сечение 2 не пройдет. Поэтому на допустимое уменьшение F_2 должно накладываться ограничение. При запирации течения в сечении 2 максимальный расход газа через это сечение можно представить в виде $G_2 = \mu_2 \vartheta \mu_* F_2$, где μ_2 — коэффициент расхода, учитывающий неравномерность параметров в сечении 2, $\vartheta \leq 1$ — коэффициент, учитывающий потери полного давления между сечениями 1 и 2. Из условия $G_1 = G_2$ определяется минимальное значение y_2^m ординаты точки 2, при котором должно происходить изменение режима течения

$$y_2^m = \left(\frac{\mu_1}{\vartheta \mu_2} \right)^{1/(k+1)} y_1 \quad (1.1)$$

где $k = 0$ и 1 в плоском и осесимметричном случаях соответственно, y_1 — ордината точки 1, которая в дальнейшем принимается за единицу длины.

В случае произвольной контура между точками 1 и 2 из формулы (1.1) можно сделать следующие качественные выводы.

1. При фиксированной геометрии сопла до точки 1 увеличение $|\theta_2|$ приводит к увеличению y_2^m (уменьшению l) из-за уменьшения в (1.1) знаменателя при $\mu_1 = \text{const}$.

2. В осесимметричном сопле из-за квадратичной зависимости площади сечения от радиуса значения l меньше, чем в плоском (с таким же контуром), несмотря на то, что коэффициент расхода при плоском течении выше, чем при осесимметричном.

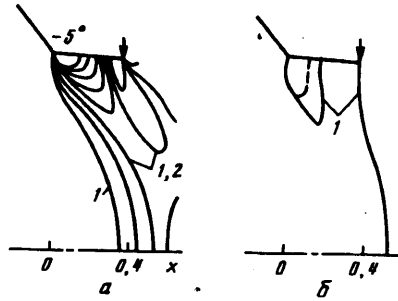
3. Уменьшение μ_1 при фиксированном значении θ_2 (например, в результате увеличения θ_1 при фиксированном значении ординаты входного участка y_0 , когда μ_1 уменьшается значительно) должно приводить к увеличению значений l с запираем течения в сечении 1, так как $\mu_2 \approx \text{const}$, а коэффициент ϑ в сверхзвуковой зоне около угла изменяется сравнительно мало.

Использование формулы (1.1) для количественных оценок затруднено тем, что в литературе нет подробных данных по коэффициенту расхода конических сопел с малыми углами сужения контура (до -5°) и тем, что коэффициент ϑ неизвестен. Приняв $\vartheta = 1$, по формуле (1.1) можно оценивать верхние значения l с запираем течения в сечении 1. Например, для осесимметричного сопла с $y_0 = 2$ и углом сужения $\theta_1 = -15^\circ$ $\mu_1 = 0,969$ [5], а для плоского (такой же геометрии), по расчетам автора, $\mu_1 = 0,976$. Если при $\theta_2 = -1$ и -2° принять, что $\mu_2 = 1$, то из формулы (1.1) получается, что течение в осесимметричном сопле с $\theta_2 = -1^\circ$ не может быть запертым в сечении 1 при $l > 0,89$, а в сопле с $\theta_2 = -2^\circ$ — при $l > 0,45$ (в плоском случае при $l > 1,37$ и $0,69$ соответственно).

При увеличении $|\theta_1|$ допущение, что $\vartheta \mu_2 = 1$, приводит к завышенным оценкам l . Так, для осесимметричного сопла с $\theta_1 = -30^\circ$ ($\mu_1 = 0,933$) и $\theta_2 = -2^\circ$ по формуле (1.1) получим $l = 0,98$. Результаты численных расчетов показывают, что уже при $l > 0,7$ течение в таком сопле запирается в сечении 2. Поэтому при $|\theta_1| \geq 20^\circ$ режим запирации предпочтительнее определять численно, рассчитывая течение в сопле.

2. Численные исследования безотрывного течения в сопле идеального совершенного газа с отношением удельных теплоемкостей $\kappa = 1,4$ проводились по модифицированному варианту программы, применявшейся в [6, 7]. Расчеты велись на адаптированных к особенностям задачи нерегулярных сетках (с трех- и четырехугольными ячейками) с пучками сеточных линий, выходящих из точек 1 и 2. Использовался метод установления с конечно-разностной схемой Годунова — Колгана, которая на адаптированных сетках позволяет рассчитывать сильноградиентные течения с приемлемым уровнем погрешностей [5].

Для различных расстояний l между сечениями 1 и 2 (при фиксированных



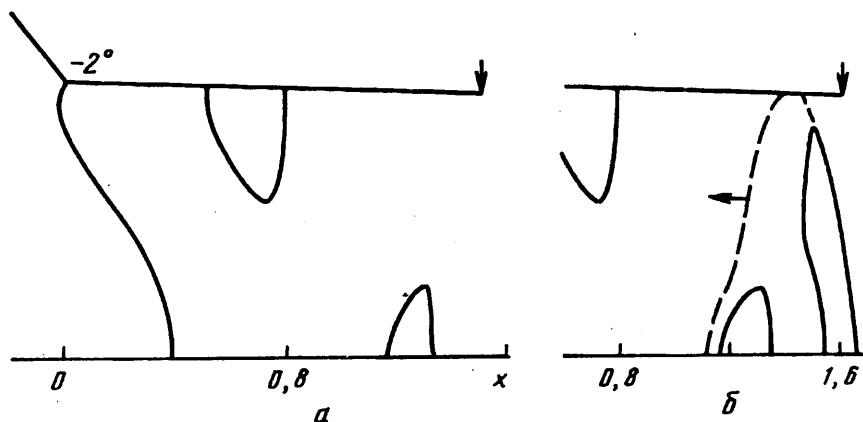
Фиг. 2

остальных геометрических параметрах сопла) рассчитывалось течение в сопле и выяснялось, при каких значениях l течение заперто в сечении 1, а при каких перестраивается и запирается в сечении 2. Затем ближайшие значения l , соответствующие различным режимам запираения, последовательно уточнялись для уменьшения интервала Δl между ними. Угол расширения контура между точками 2 и 3 принят равным 5° , что позволяет использовать полученные результаты и в случае сужающегося сопла с двумя створками при достаточно низком внешнем давлении.

Некоторые результаты расчетов приведены на фиг. 1. Штриховыми и сплошными линиями отмечены дорожки интервалов Δl для плоских и осесимметричных сопел с значениями $y_0 = 2$, $\theta_1 = -50^\circ$ при изменении угла сужения второй створки θ_2 от -1 до -5° . Следует отметить, что точное определение условия изменения режима течения в сопле требует значительных затрат счетного времени, так как при значениях $y_2 \rightarrow y_2''$ установление решения идет крайне медленно, особенно в тех случаях, когда происходит изменение режима течения. При уменьшении $|\theta_2|$ расчетная область растет, что приводит не только к увеличению счетного времени, но и к снижению точности расчета расхода, который определяет режим течения в сопле. Поэтому при значении $\theta_2 = -5^\circ$ интервал Δl , отделяющий значения l с различным режимом запираения, уменьшался до значения 0,01, а при $\theta_2 = -2^\circ$ он был шире, но не более 0,2.

На фиг. 2 с помощью изолиний чисел M (с интервалом 0,1) показано, что в осесимметричном сопле с $y_2 = 2$, $\theta_1 = -50^\circ$ и $\theta_2 = -5^\circ$ незначительное изменение l приводит к двум различным режимам течения. При $l = 0,37$ (фиг. 2, а) течение заперто в сечении $x = 0$. Скачок уплотнения, выходящей из излома контура, из-за того, что в используемой программе расчета разрывы параметров течения явно не выделяются, оказывается «размазанным» и не проявляется столь отчетливо, как при расчетах [3] методом характеристик. Звуковая линия около оси располагается непосредственно перед минимальным сечением $x = 0,37$ (показано стрелкой). Центральная часть минимального сечения заполнена волнами разрежения, выходящими из излома, а пристеночная — волнами сжатия, идущими от контура второй створки.

Расход с такого рода неравномерностью в сечении $x = 0,37$ при увеличении l на 0,01 уже не может пройти через минимальное сечение, которое смещается в положение $x = 0,38$. Поэтому около стенки перед этим сечением образуется область с числами M , несущественно меньшими единицы, которая при счете опускается к оси, вытесняя сверхзвуковое течение. При замыкании на ось правая граница этой области запирает течение в минимальном сечении, а левая — соединяется со звуковой линией. Затем сверхзвуковая зона уменьшается, стягиваясь в сравнительно небольшую область около излома (фиг. 2, б). При дальнейшем увеличении l происходит аналогичная перестройка течения, только сверхзвуковая зона около излома уменьшается (штриховая линия на фиг. 2, б соответствует значению $l = 0,5$).



Фиг. 3

При уменьшении $|\theta_2|$ значения l , при которых течение заперто в сечении l , увеличиваются и структура течения между сечениями l и 2 усложняется. В качестве примера на фиг. 3, а, приведены линии $M = 1$ в случае плоского сопла с $\theta_2 = -2^\circ$. При $l = 1,5$ течение заперто в сечении $x = 0$. Поток в минимальном сечении, что следует особо отметить, является сверхзвуковым по всему сечению (дозвуковая зона около нижней стенки, совпадающей с осью x , заканчивается перед ним). Около контура второй створки поток тормозится до дозвуковых скоростей в волнах сжатия, идущих от начального его участка, а затем ускоряется в волнах разрежения, отражающихся от нижней стенки, что приводит к образованию местной дозвуковой зоны.

Теоретическое обоснование образования дозвуковой зоны около створки плоского сопла непосредственно перед минимальным сечением, когда звуковая линия, ограничивающая дозвуковую зону, приходит на конец створки, приведено в [8]. Результаты расчетов показывают, что случай, рассмотренный в [8], реализуется при определенных условиях, но, как видно из фиг. 3, а, является частным. Течение, показанное на фиг. 3, а, при увеличении l до некоторого значения практически остается неизменным при $x \leq 1,4$.

При $l = 1,6$ (фиг. 3, б) около нижней стенки в области минимального сечения образуется еще одна дозвуковая зона, которая при счете растет в основном к верхней стенке. После замыкания на верхнюю стенку левая ее граница с $M = 1$ начинает смещаться против потока (такая фаза развития течения в процессе счета показана на фиг. 3, б штриховой кривой), уменьшая область запертого течения. В результате «взаимодействия» ее и звуковой линии, выходящей из излома, остается сверхзвуковая зона около излома и течение оказывается запертым, но уже в сечении 2.

В сопле с цилиндрическим участком ($\theta_2 = 0$) течение идеального газа заперто в сечении l при $l \rightarrow \infty$ (конечно, при соответствующих условиях справа расчетной области, в конце цилиндрического участка: за цилиндрическим участком форма стенки или границы струи не должны вызывать торможение течения до дозвуковых скоростей по всему сечению). Отметим, что запирающее течение невязкого газа в сечении излома в соплах с цилиндрическим участком контура получено в [9—11].

Таким образом, основная причина, приводящая к разрушению запертого течения перед минимальным сечением, — уменьшение площади этого сечения при увеличении длины второй створки с фиксированным углом сужения или при отклонении створки с фиксированной длиной вниз.

Наряду с вопросом о возможности сверхзвукового в целом течения перед минимальным сечением возникают вопросы о том, как и при каком внешнем

давлении образуется такое течение в сужающемся сопле с двумя створками. Для ответа на эти вопросы течение в сопле должно рассчитываться совместно со струей. Граница струи, заранее неизвестная, определяется в процессе установления решения. При этом, как показывает опыт, колебания ее могут быть значительными. Этот чисто счетный эффект изменения поперечных сечений струи приводит к искусственному ограничению или увеличению расхода через сопло, что затрудняет выяснение условий запирания течения.

Полное решение задачи об образовании запертого течения в сужающемся сопле выходит за рамки настоящей работы. Решение ее в упрощенной постановке, при замене границы струи расширяющимся участком стенки (фиг. 1), не позволяет определить внешнее давление, при котором происходит запираание течения, но дает возможность представить, как происходит запираание.

Результаты расчетов показывают, что процесс запираания течения происходит в основном в обратном порядке по отношению к процессу разрушения запертого течения. Переход к установившемуся течению от начального состояния, задаваемого с помощью одномерной теории (дозвуковое течение — до минимального сечения и сверхзвуковое — за ним), происходит следующим образом. В процессе счета звуковая линия около минимального сечения искривляется, а около угла перед ним образуется сверхзвуковая зона. При достаточно большой длине второй створки такая структура течения с запираанием в минимальном сечении сохраняется до полного установления решения.

При уменьшении длины второй створки сверхзвуковая зона около излома увеличивается и опускается к оси x . Если длина створки оказывается меньше некоторой, сверхзвуковая зона замыкается на ось x . При дальнейшем счете левая граница сверхзвуковой зоны практически остается на месте, что соответствует запираанию течения в сечении I , а правая смещается вниз по потоку, увеличивая область запертого течения. В результате «взаимодействия» ее и звуковой линии около минимального сечения происходит частичное разрушение этих линий. Оставшиеся их части образуют дозвуковую зону либо около стенки перед минимальным сечением, либо около оси x в области минимального сечения, либо вверху и внизу одновременно (в зависимости от геометрии сопла).

Следует отметить, что исследование процесса образования запертого течения требует еще большего времени счета, чем процесса разрушения. Объясняется это, по-видимому, тем, что образование сверхзвуковой зоны около излома приводит не только к потерям полного давления, но и к росту погрешностей расчета параметров течения в пристеночном слое. Это приводит к сравнительно медленному увеличению сверхзвуковой зоны около излома, а впоследствии — к замедлению движения волны вниз по потоку по мере приближения к минимальному сечению. Поэтому в ряде случаев такое завершение процесса запираания течения, как описано выше, не достигалось как из-за ограничений по времени, так и из-за нарушения устойчивости счета в области попадания скачка уплотнения, выходящего из излома, на ось x , где отражение его может быть нерегулярным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киреев В. И., Лифшиц Ю. Б. О трансзвуковом течении газа в осесимметричных соплах Лавалья с крутыми стенками//Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 6. С. 55—58.
2. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Течения газа в соплах. М.: Изд-во МГУ, 1978. 351 с.
3. Hardy J.-M. Blocage tri-dimensional interne dans une tuyere convergente bi-conique//Z. Flugwiss. 1976. В. 24. № 5. С. 258—261.
4. Бойченко В. С., Лифшиц Ю. Б. Трансзвуковое течение около выпуклого угла//Уч. зап. ЦАГИ. 1976. Т. 7. № 2. С. 8—16.
5. Крайко А. Н., Тилляева Н. И., Щербаков С. А. Метод расчета течений идеального газа в плоских и осесимметричных соплах с изломами контура//Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1986. Т. 26. № 11. С. 1679—1694.

6. *Зимонт В. Л., Ягудин С. В.* Об увеличении точности определения интегральных характеристик сопел на основании численных расчетов поля течения//Уч. зап. ЦАГИ. 1978. Т. 9. № 3. С. 53—62.
7. *Зимонт В. Л., Ягудин С. В.* Влияние радиуса кривизны контура сверхзвукового сопла в критическом сечении на расходные характеристики невязкого потока со ступенчатым распределением полного давления//Уч. зап. ЦАГИ. 1985. Т. 16. № 2. С. 112—116.
8. *Щербаков С. А.* Формирование ударной волны при взаимодействии со слабым разрывом на границе местной дозвуковой зоны//Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 4. С. 152—158.
9. *Тагиров Р. К., Чефанов В. М.* Расчетно-экспериментальное исследование газодинамики плоских симметричных сопел, имеющих участок постоянной высоты и две точки излома контура в области критического сечения//Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 4. С. 100—105.
10. *Алексеев В. А., Сафонов В. П., Щербаков С. А.* Исследование газодинамических характеристик плоского или осесимметричного сопла с прямолинейной образующей сверхзвуковой части//Уч. зап. ЦАГИ. 1989. Т. 20. № 6. С. 100—104.
11. *Васильев О. А., Минин С. Н., Шиповских А. В.* Исследование структуры течения в соплах с участком постоянной высоты в области минимального сечения//Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 6. С. 160—166.

Москва

Поступила в редакцию
18.XII.1992