

СВЕРХЗВУКОВАЯ КОЛЬЦЕВАЯ СТРУЯ

А. И. Швеиц

(Москва)

Экспериментально исследовано течение в сверхзвуковых кольцевых струях. Определены схемы взаимодействия скачков при перестройке от открытой донной области к закрытой. Выделены основные параметры, характеризующие структуру отрывного течения.

При расположении плотной связки сопел по окружности донного среза истекающая струя при некоторых режимах подобна кольцевой струе. Кроме того, не исключена возможность использования в ряде случаев специальных кольцевых сопел. Кольцевые сопла имеют ряд преимуществ перед соплами Лаваля (например, меньше потери тяги при перерасширении, удобство компоновки в кормовой части). На практике целесообразны сильно укороченные кольцевые сопла, поэтому определение тяги таких сопел связано с изучением отрывного течения за торцом центрального тела. Представляет интерес также исследование режимов течения в кольцевых струях при изменении давления во внешней среде.

В последние годы появился ряд публикаций, в которых содержатся результаты исследований течений в кольцевых соплах и струях. Численные расчеты течения в кольцевых соплах приведены в [1]. С помощью разностной схемы [2] и метода характеристик [3] рассчитано течение в кольцевом сопле с центральным телом.

Развиваются также приближенные методы расчета кольцевых струй. Для расчета донного давления на торце кольцевого сопла использовался метод, разделяющий линии тока. Расчет отрывного течения в кольцевых соплах [4], выполненный на основании интегральных методов, производился исходя из квазиодномерных моделей для течений с открытой и закрытой донными областями. Для сопла с центральным телом, имеющим подвод массы в донную область, получено решение для невязки основного и эжектируемого потоков [5]. Параметры сверхзвукового потока в струе определялись методом характеристик, параметры дополнительного потока — с помощью одномерной теории.

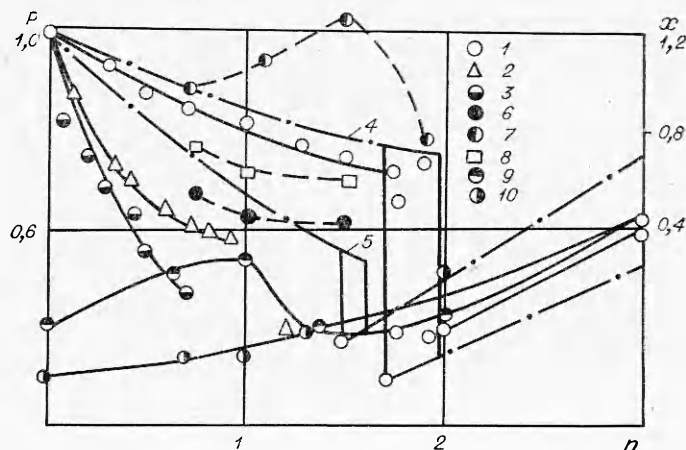
Для кольцевых струй несжимаемой жидкости имеются приближенные расчеты и экспериментальные исследования донного давления. Проводятся исследования тонких кольцевых струй малой скорости применительно к аппарату на воздушной подушке. Ряд публикаций посвящен турбулентному смешению коаксиальных струй: свободных, в канале, при наличии вторичных течений, твердых частиц и химических реакций.

Большое внимание уделялось изучению течения в донной области многосопловых компоновок. Рассчитано донное давление на основе метода разделяющей линии тока при истечении ряда струй на режиме «запирания» донной области [6]. Выполнены численные расчеты нескольких случаев истечения струй из четырехсоплового блока в спутный сверхзвуковой поток [7]. Для связок сопел экспериментально изучено влияние

числа сопел и их расположения на величину донного давления и на тяговые характеристики. Представляют интерес данные о параметрах течения непосредственно в отрывной зоне и о характере взаимодействия скачков уплотнения при изменении режимов течения кольцевой струи.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований течения в сверхзвуковых кольцевых струях. Эти исследования позволили, с одной стороны, изучить режимы течения на более простых по сравнению с кольцевой связкой сопел моделях, а с другой — получить некоторые дополнительные данные для построения расчетных схем. Испытывались кольцевые струи, образованные плоскими в радиальном течения соплами с расчетными числами Маха $M_j=1,35; 2; 3,1$ и $3,6$, диаметр внутренней кромки составлял $87,6$ мм, наружной (D) — 110 мм, отношение площади кольца к полной площади сопла — $36,5\%$. Испытывалось также сопло с $M=2,5$ с диаметром внутренней кромки $101,8$ мм. Плоский торец кольцевого сопла дренирован по радиусу с шагом $\Delta D=0,045$. Измерение давления в кольцевой струе производилось с помощью насадков полного и статистического давлений с наружным диаметром $1,2$ мм, которые установлены на автоматическом координатнике.

Отрывное течение. Распределение давления по радиусу центральной части сопла сохранялось примерно постоянным. Зависимость относительного донного давления $P=P_i/P_\infty$ (P_i — измеренное давление; P_∞ — давление в окружающем пространстве) от степени нерасчетности истекающей струи $n=P_a/P_\infty$ (P_a — статическое давление на выходной кромке сопла) для сопел с $M=2; 3,1; 3,6$ (кривые 1—3 соответственно) представлена на фиг. 1. Увеличение степени нерасчетности приводит к уменьшению донного давления, причем для больших значений M кривая давления располагается ниже. Для сопла с $M_j=1,35$ при нерасчетности $0,1-0,2$ наблюдалось повышение давления. Для каждого M_j существует определенное значение нерасчетности n° , при котором реализуется переход от снижения к повышению давления — критический режим. Это значение n° тем меньше, чем больше число M_j истекающей струи. Уменьшение давления соответствует открытой донной области, а увеличение — закрытой. Измерения полных давлений показали, что закрытие донной области происходит при распространении сверхзвукового участка до места взаимодействия струй, при этом донное давление снижается скачком и достигает минимального значения. До закрытия скорость вдоль оси струи дозвуковая, после закрытия донная область окружена сверхзвуковым потоком, давление в ней не



Фиг. 1

зависит от давления внешней среды и растет пропорционально давлению в форкамере.

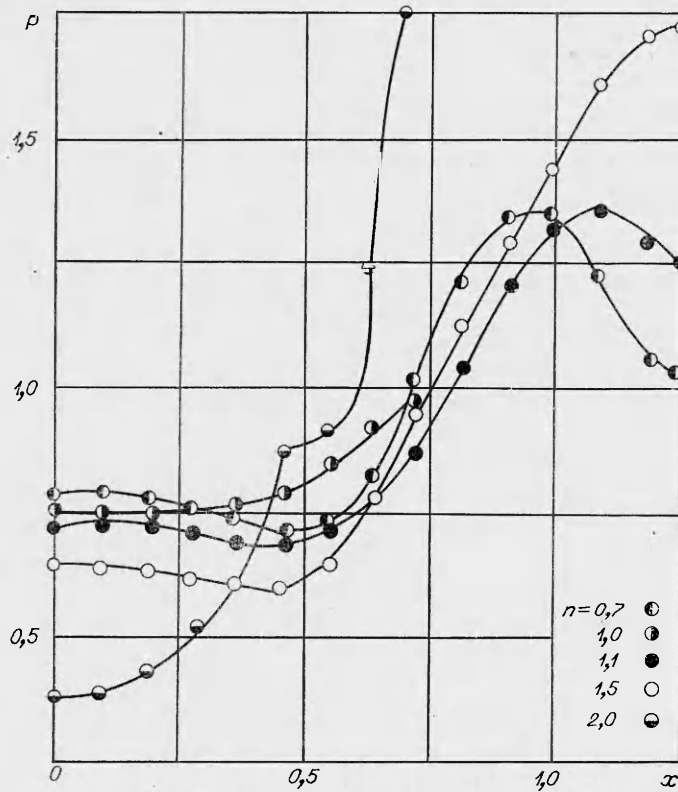
На графике наряду с экспериментальными данными приведена расчетная двухпараметрическая зависимость относительного донного давления ($M_j=2$ и 3 , кривые 4 и 5) от степени нерасчетности и числа Маха в выходном сечении сопла, где поток принят равномерным и параллельным оси [4]. Для сопла с $M_j=2$ в режиме открытой донной области расчетные значения располагаются выше экспериментальных, а в режиме закрытой — ниже. В расчетах получено немонотонное изменение донного давления в замкнутой донной области в зависимости от M_j , что объясняется противоположным влиянием интенсивности волны разрежения, падающей на ближний след, и величины M_j .

Скоростной киносъемкой течения обнаружены резкие колебания структуры струи при переходе через критический режим, при этом реализуются интенсивные расходные колебания донного давления с низкой частотой ($\Delta P \approx 0,4$, частота ~ 20 Гц). Величины давлений и значения n отличаются на $10-20\%$ при подходе к n^0 со стороны больших или меньших нерасчетностей. Гистерезис связан с предысторией изменения режима при переходе от одного устойчивого положения к другому. В расчетах [4] указана возможность возникновения квазистационарных колебаний и дана приближенная оценка области гистерезиса. Отметим, что для ее детального исследования и точного определения n^0 необходимо переходить к «сквозным» численным методам расчета невязкого потока. Пульсации давления при перестройке течения наблюдались в экспериментах с многосопловыми компоновками и с тарельчатыми соплами [8]. Интересно отметить, что акустическое излучение кольцевой струи, в том числе и дискретная составляющая в спектре пульсаций давления, снижается в процессе перестройки [9].

Распределение статического давления по оси следа модели с $M_j=2$ дано на фиг. 2. С увеличением нерасчетности максимум статического давления смещается вниз по потоку, а после перестройки ($n^0 \approx 1,8$) — вверх, при этом давление резко возрастает. Минимальное значение статического давления на оси следа соответствует максимальной скорости возвратного потока. Вблизи донного среза статическое давление возрастает в результате торможения возвратного потока.

Точка торможения на оси следа определялась на основании измерений статического и полного давлений обратных токов. Перемещения точек минимального и максимального статических давлений и точки торможения при изменении нерасчетности струи с $M_j=2$ показаны на фиг. 1 (кривые $6-8$ соответственно). Точка торможения с увеличением нерасчетности приближается к торцу сопла.

По фотографиям течения определены относительные размеры струи и отрывной зоны (фиг. 3, a , $M_j=3,6$; $l'=l/D$; $d'=d/D$). Полученные данные свидетельствуют о том, что в отрывной зоне кольцевой струи образуется тороидальное циркуляционное течение, оканчивающееся сужением, напоминающим горло следа. Сужение, образованное первой ячейкой (d_2' , l_2' — кривые $1, 2$), при малых нерасчетностях мало отличается от диаметра центрального тела. Увеличение нерасчетности свыше $n=0,4$ реализует уменьшение первого сужения и смещение его вниз по потоку, причем особенно интенсивно этот процесс происходит в окрестности критического режима. Аналогичное влияние оказывает изменение степени нерасчетности и на величины d_3' и l_3' (кривые 3 и 4), однако при нерасчетности $n \approx 0,8$ возникает перестройка течения и вторая ячейка исчезает. Внешнее горло струи (d_4' , l_4' — кривые $5, 6$) по мере роста нерасчетности расширяется и удаляется от донного среза.

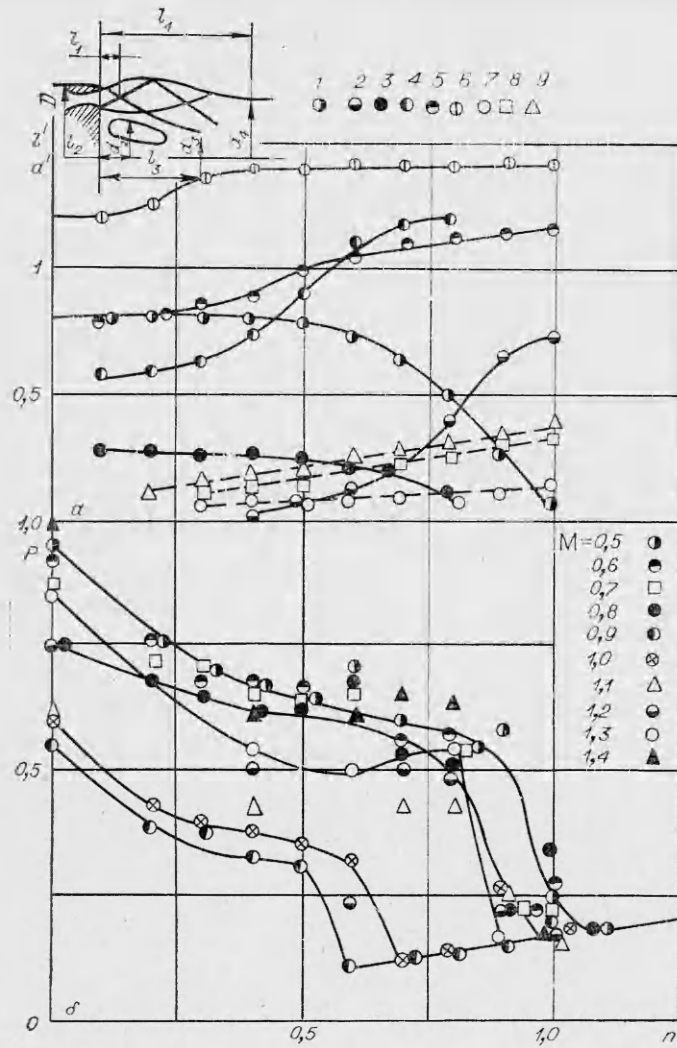


Фиг. 2

Поведение внутренней и внешней границ кольцевой струи при изменении степени нерасчетности различно. Если для внутренней границы определяющим фактором является режим течения с открытой или закрытой донной областью, то внешняя граница изменяется аналогично струе, истекающей из сопла Лавала — по мере снижения внешнего давления границы отходят от осп, а длина ячейки увеличивается.

Взаимодействие скачков. Основное отличие сверхзвуковой кольцевой струи от сплошной круглой заключается в существовании двух режимов истечения: с открытой и закрытой донной областью, а также разности давлений на ее внешней и внутренней поверхностях. Эти факторы реализуют схему течения с системами волн сжатия и разрежения, различными во внешней и внутренней частях струи. Поскольку величина нерасчетности задается по отношению к внешнему давлению, возможны режимы, когда течение в струе по отношению к внешнему потоку будет перерасширенным, а к внутреннему — недорасширенным. Для конкретных условий истечения, зависящих от числа Маха и степени нерасчетности, перестройка течения по отношению к наружному давлению может происходить как для перерасширенной, так и для недорасширенной струи. В то же время по отношению к внутреннему давлению перестройка всегда наступает для недорасширенной струи.

Форма кольцевого сопла также играет важную роль в организации схемы течения. Так, например, сопло с $M_j=2,5$ имеет выходную щель почти в 2 раза уже, чем остальные сопла. В этом случае для распространения сверхзвукового участка до оси необходимо иметь большую нерасчет-



Фиг. 3

ность. Если характеристики, отходящие от наружной кромки сопла, пересекаются на оси струи за звуковой точкой, то внешние возмущения не могут воздействовать на отрывное течение. Поэтому задаваемая по отношению к P_∞ нерасчетность не может однозначно определить течение в кольцевой струе, однако для заданной формы сопла она является объективным показателем процесса.

Кольцевая струя и образующиеся в ней скачки уплотнения значительно искривляются в направлении оси симметрии. Это связано с разностью давлений на внешней и внутренней поверхностях струи, с искривлением характеристик в осесимметричном течении и с изменением степени расширения потока вдоль щели кольцевого сопла. При значительном перерасширении кольцевой струи ($n < 0,3$) в результате взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем происходит отрыв струи от стенок сопла и ее диаметр становится несколько меньше, чем у струи при безотрывном обтекании.

У струи с $M_j=2$ в критическом режиме внешние висячие скачки образуют маховскую конфигурацию волн. Этот случай напоминает структуру одиночной цилиндрической струи при больших нерасчетностях, когда от ячеистой структуры остается только первая ячейка, заканчивающаяся прямым или мостообразным скачком, за которым струя сильно турбулизируется и течение продолжается с дозвуковой скоростью. По мере роста нерасчетности диск Маха отходит от сопла, при $n=2,5$ внешний и внутренние висячие скачки сначала пересекаются регулярно, а затем возникает маховское взаимодействие отраженных внешних скачков.

Для струи с $M_j=3,1$ в критическом режиме внешний и внутренний висячие скачки сначала пересекаются регулярно на расстоянии $1,3D$ от сопла, а затем (примерно через $0,1D$) реализуется маховское взаимодействие отраженных внешних скачков.

С увеличением давления размеры ячеек растут, а число ячеек уменьшается. Например, если при $n<0,5$ струя с $M_j=3,6$ состоит из трех ячеек, то при $n=0,8$ — из двух. Между нерасчетностями 0,8 и 0,9 струя мгновенно перестраивается таким образом, что видна только первая, значительно увеличенная ячейка, которая резко удлиняется и расширяется внутрь. В критическом режиме струи с $M_j=3,6$ внутренний и внешний висячие скачки сначала регулярно взаимодействуют, а затем внешние отраженные скачки доходят до оси струи без образования маховского диска. По мере возрастания числа Маха струи угол наклона внутреннего висячего скачка к оси симметрии уменьшается и для $M_j=3,6$ внутренний скачок почти параллелен оси.

При подходе к критическому режиму волна расширения начинает взаимодействовать с ближним следом, что приводит к резкому уменьшению давления в отрывной зоне. Для всех испытанных сопел в закритическом режиме застойная зона окружена только первой ячейкой струи, хотя в зависимости от параметров струи структура течения различна. Большое влияние на структуру струи оказывает степень расширения сопла. По фотографиям струй с числами $M_j=3,1$ и $3,6$ видно, что при одном и том же давлении в форкамере ($P_0=45$ ати) в первом случае донная область закрыта, а во втором — открыта.

На фиг. 3,а представлена зависимость относительного расстояния от среза сопла до точки взаимодействия скачков в струе i_1 ($M_j=2; 3,1$ и $3,6$; кривые 7—9) от степени нерасчетности. Аналогично круглой струе это расстояние линейно увеличивается по мере повышения нерасчетности, у сопла с большей скоростью истечения рост величины i_1 происходит более интенсивно. Отметим, что в случае подвода газа в центральную часть кольцевого сопла полное давление вдуваемого газа играет решающую роль в образовании контуров струй, например, при увеличении полного давления в два раза расстояние от кромки сопла до точки пересечения скачков уменьшается наполовину [5].

В результате опытов выделены основные параметры сопел и струй, определяющие режим течения. Показано, что перестройка открытой донной области к закрытой реализуется при взаимодействии сверхзвуковых участков струй, при этом донное давление снижается скачком и достигает минимального значения. В процессе перестройки реализуют интенсивные расходные колебания давления с низкой частотой; в то же время акустическое излучение струи и дискретная составляющая в спектре пульсаций давления снижаются [9].

Течение в спутном потоке. Исследования струи, истекающей в спутный поток, выполнялись на модели, состоящей из цилиндра (диаметр

110 мм, длина 300 мм) и конической передней части с углом полураствора 21° . Модель крепилась на боковой пластине, передняя и задняя части которой имели клиновидные скосы. Пластина располагалась на удалении 1,5 калибра от донного среза.

Испытания струи проведены в аэродинамической трубе с размером рабочей части 600×600 мм при числах Маха набегающего потока $M = 0,5 \div 1,4$; 2 и 3. Числа Рейнольдса, рассчитанные по параметрам набегающего потока и отнесенные к диаметру модели, изменялись от $1,3 \cdot 10^6$ до $3 \cdot 10^6$.

В донной части модели устанавливались кольцевые сопла с $M_j = 2$; 3,1 и 3,6. При росте скорости набегающего потока статическое давление в рабочей части снижается, поэтому с целью сохранения постоянного значения нерасчетности для каждого числа M определялось соответствующее давление в ресивере струйной модели.

Рассматривая зависимость донного давления, измеренного в центральной точке торца сопла, от степени нерасчетности струи с $M_j = 3,6$, истекающей в спутный дозвуковой и трансзвуковой поток, можно выделить некоторые общие закономерности по изменению донного давления и по возникновению критического режима течения (см. фиг. 3,б). Для скорости спутного потока $M = 0,5 \div 0,8$ критический режим наступает при большей нерасчетности, чем при истечении в затопленное пространство, для $M = 0,9$ — при меньшей ($n = 0,6$). Структура сверхзвуковой струи, истекающей из сопла в спутный дозвуковой поток, в основном аналогична структуре струи, истекающей в затопленное пространство.

При малой сверхзвуковой скорости внешнего потока увеличение давления в форкамере сначала вызывает уменьшение донного давления, при $n = 0,6 \div 0,8$ донное давление повышается, а переход к критическому режиму опять связан со снижением давления. При истечении струи в сверхзвуковой поток перед расширяющейся струей, как перед твердым телом, образуется внешний скачок уплотнения, а давление на контактной поверхности, отделяющей струю от внешнего потока, является переменным. Отмеченное повышение давления определяется ростом давления за внешним скачком уплотнения, так как донная область открыта и повышение внешнего давления сказывается на увеличении донного давления. В случае истечения в затопленное пространство после закрытия донной области внешнее давление не оказывает влияния на величину донного давления, и оно определяется только параметрами истекающей струи. Величины P в критическом режиме и в режиме замкнутой донной области для всех нерасчетностей независимо от скорости спутного потока ($M = 0,5 \div 3$) располагаются на одной прямой, проходящей через начало координат.

В случае истечения в спутный поток кольцевая струя имеет некоторые особенности по сравнению с круглой одиночной струей. Для круглой струи ($M_j > M$) минимальная величина донного давления реализуется при истечении перерасширенной струи и примерно соответствует режиму «запуска» сопла. Как показано выше, для кольцевой струи ($M_j > M$) минимальное значение донного давления достигается перед перестройкой течения от открытой к закрытой донной области, что может соответствовать как перерасширенной, так и недорасширенной струе.

Перестройку течения, происходящую в районе дозвуковых и трансзвуковых скоростей, рассмотрим на примере истечения кольцевой струи с $M_j = 3,6$ при нерасчетности, близкой к критической ($M = 0,8$). Увеличение скорости спутного потока от $M = 0,5$ до $M = 0,8$ не вызывает существенных изменений в структуре: длина первой ячейки, диаметры горла следа в районе первой и второй ячеек остаются практически постоянными. Переход от $M = 0,8$ до $0,9$ влечет перестройку струи — донная об-

ласть закрывается; по отношению к внешнему потоку струя перерасширена, к внутреннему — недорасширена. Скачок уплотнения, отходящий от наружной кромки сопла, проходит по сильно расширенной внутрь первой ячейки струе, регулярно пересекается сначала с внутренним висячим скачком, а потом с внешним от противоположной кромки и доходит до границы струи.

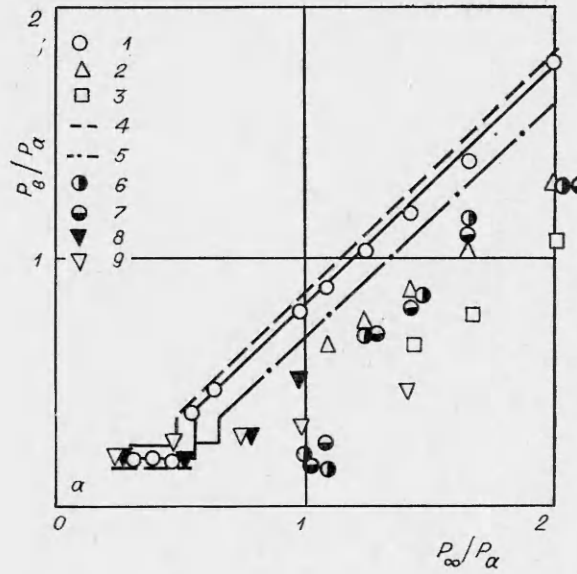
Рост скорости от $M=1,1$ до $M=1,2$ связан с повторной перестройкой структуры струи — донная область открывается. Это сопровождается появлением второй ячейки и уменьшением размеров первой (в основном за счет увеличения диаметра горла). Полученное течение напоминает структуру кольцевой струи при $M=0,5$ с тем отличием, что первая ячейка немного укорачивается, а сечение кольцевой струи сжимается.

Закрытие донной области в околосвуковом диапазоне скоростей для нерасчетностей, близких к критическим, можно объяснить следующим образом. При околосвуковой скорости внешнего потока вблизи кромки сопла возникает местная сверхзвуковая зона, ограниченная в районе горла струи скачком уплотнения. В этой зоне давление ниже давления на набегающем потоке, поэтому реализуемая степень нерасчетности становится больше заданной и достигает критической величины. Это приводит к закрытию донной области при значениях n , меньших, чем при истечении в затопленное пространство. Повышение скорости внешнего потока сопровождается переходом к полностью сверхзвуковой картине обтекания со сверхзвуковой скоростью за замыкающим скачком. Перед первой ячейкой струи возникает скачок уплотнения, и давление на поверхности раздела растет; следовательно, для заданной нерасчетности реализуемое значение n будет меньше критического, и донная область открывается.

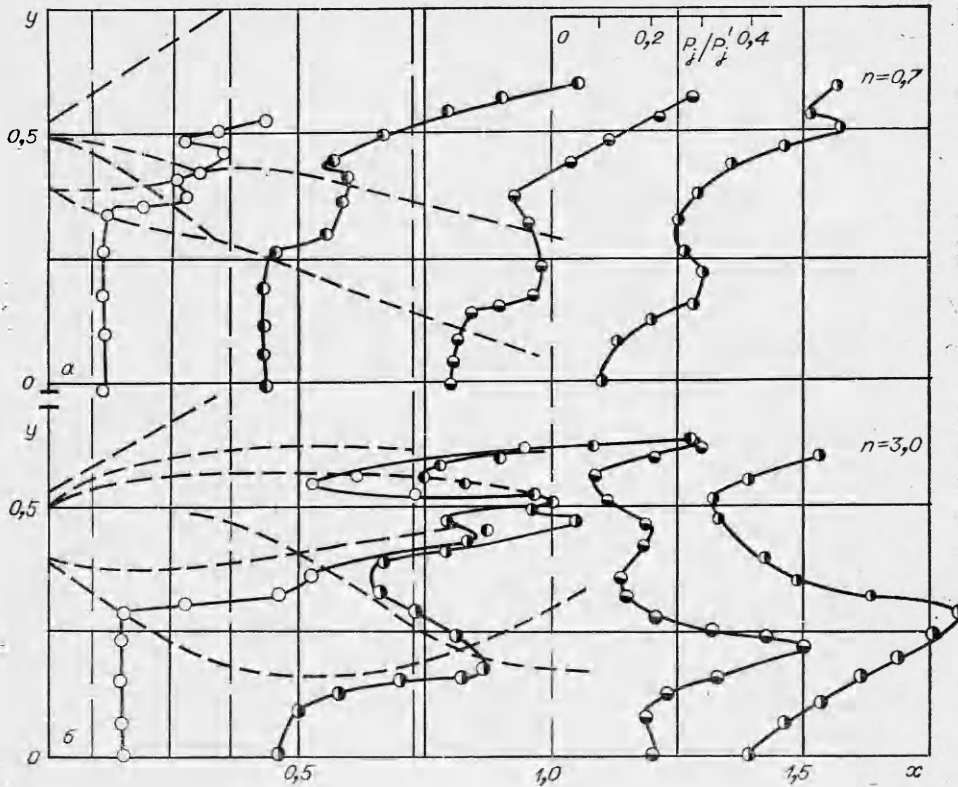
Исследования кольцевой струи, истекающей в спутный сверхзвуковой поток, выполнялись на модели, установленной на боковой пластине, что обычно приводит к появлению возмущений течения в донной области, особенно в случаях погружения державки в срывную зону, образующуюся в результате взаимодействия сильно недорасширенной струи со сверхзвуковым набегающим потоком [10]. В экспериментах относительная толщина державки составляла меньше $1/5$, струя истекла либо перерасширенная, либо слабо недорасширенная; в случае образования отрывной зоны на цилиндре она не достигала державки, а возмущенный участок набегающего потока взаимодействовал с поверхностью сверхзвуковой кольцевой струи. Это приводило к отклонению кольцевой струи на величину порядка одного градуса и не оказывало существенного влияния на течение в отрывной зоне и на данные измерений давления в сечениях вне возмущенного участка.

Как и при истечении в затопленное пространство, распределение давления по торцу сопла меняется незначительно. Значения донного давления при истечении струи в спутный сверхзвуковой поток с $M_j=2$ и 3 приведены на фиг. 1 (кривые 9, 10). В первом случае для режима открытой донной области реализуется локальный максимум величины P . Сопоставляя поведение кривой давления с фотографиями потока, можно построить следующую картину течения. При обтекании модели без струи внешний поток разворачивается в волне разрежения до величины донного давления, соответствующей $M=2$. По мере роста степени нерасчетности истекающая струя сначала является источником дополнительной массы в донной области, затем до запуска сопла струя отрывается вблизи критического сечения и статическое давление на выходе становится больше расчетного для данного числа M_j . Эти факторы содействуют увеличению донного давления.

На фиг. 4 представлена зависимость $P_b/P_a = f(P_\infty/P_a)$, построенная для истечения в затопленное пространство и в спутный поток ($M=0$; $M_j=2$; 3,4 и 3,6; расчет $M=0$; $M_j=2$ и 3 [4]; $M=0,5$ и 0,7; $M_j=3,6$; $M=2$ и 3; $M_j=2$, кривые 1-9 соответственно). В режиме открытой донной области эти зависимости мало отличаются от линейных, и тангенс угла наклона для всех кривых близок к единице. В критическом режиме величина P_b/P_a снижается скачком, а в режиме закрытой донной области сохраняется постоянной.



Фиг. 4

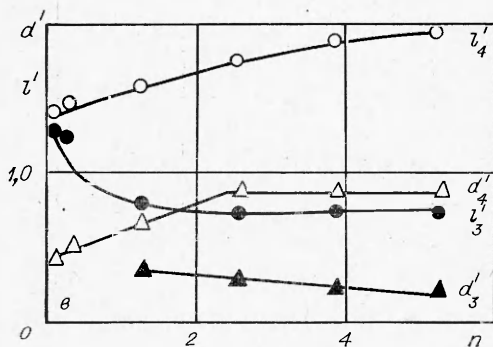


Фиг. 5

Для сверхзвукового обтекания струи ($M=3$; $M_j=2$) на фиг. 5 представлены полные давления и контуры течения по тепловым снимкам (пунктир). Величина давления, измеренная трубкой полного напора P_j , отнесена к давлению за прямым скачком в расчетной струе P'_j . Внутренняя граница струи совпадает с данными измерения давления, участок постоянного давления в центре струи соответствует циркуляционному течению. С ростом степени нерасчетности зона максимального давления в струе приближается к оси. Перестройка течения сопровождается существенным уменьшением размера циркуляционной зоны, причем в режиме закрытой донной области полное давление в центральной части растет и границы струи расширяются.

Истекающая кольцевая струя сужается, и наименьшее сечение струи по аналогии с ближним следом можно назвать горлом, при обтекании которого возникает скачок уплотнения. Увеличение нерасчетности расширяет струю и горло, скачок приближается к соплу, давление на внешней границе первой ячейки растет, и перестройка течения происходит позже, чем при истечении в затопленное пространство. После перестройки течения увеличение давления в форкамере модели связано не только с уменьшением угла разворота внешнего потока, но и с выходом кольцевой струи за пределы сопла, сопровождаемым образованием скачка уплотнения. Но в режиме закрытой донной области застойная область окружена сверхзвуковым потоком и величина донного давления не зависит от давления на внешней границе струи. В этом случае для определенных параметров истечения донное давление сохраняется постоянным независимо от того, истекает кольцевая струя в затопленное пространство или в спутный поток.

По фотографиям течения определены характерные размеры циркуляционной зоны (фиг. 6, $M=3$; $M_j=3,6$; обозначения те же, что и на фиг. 3,а.) Увеличение степени нерасчетности недорасширенной струи



Фиг. 6

вызывает уменьшение циркуляционной зоны, при этом диаметр горла суммарной струи и расстояние до него растут. После образования маховской конфигурации волн висячий скачок уменьшает угол наклона к оси и маховский диск удаляется от сопла. Исследования структуры цилиндрических турбулентных недорасширенных струй показали, что спутный сверхзвуковой поток оказывает существенное влияние на струю, приводя к «вырождению» центрального скачка и

уменьшению размеров начального участка [11].

В результате опытов со струей в спутном дозвуковом потоке установлено, что для нерасчетностей, близких к критическим, реализуется закрытие донной области. Это объясняется возникновением местной сверхзвуковой зоны вблизи кромки сопла. В режиме открытой донной области зависимости $P_b/P_a = f(P_\infty/P_a)$ мало отличаются от линейных, и тангенс угла наклона кривых близок к единице; в режиме закрытой донной области значения P_b/P_a сохраняются постоянными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Овсянников А. М.** Расчет течения в дозвуковой и трансзвуковой частях кольцевых сопел.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1971, № 6.
2. **Иванов М. Я., Крайко А. Н.** Метод сквозного счета для двумерных и пространственных течений.— «Журн. вычислит. математики и мат. физики», 1972, т. 12, № 3.
3. **Виленский Ф. А., Волгонская Т. Г., Грязнов В. П., Пирумов У. Г.** Исследование нерасчетных режимов осесимметричного кольцевого сопла с центральным телом.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1972, № 4.
4. **Степанов Г. Ю., Гогиш Л. В.** Квазидномерная газодинамика сопел ракетных двигателей. М., Машиностроение, 1973.
5. **Ли.** Газодинамическая структура струй, истекающих из сопел с центральным телом.— «Ракетн. техн. и косм.» 1966, № 6.
6. **Гинзбург И. П., Приходько В. Д., Сизов А. М.** Исследование составных струй.— «Учен. зап. Ленингр. ун-та», 1970, № 357. Сер. Газодинамика и теплообмен.
7. **Бондарев Е. Н., Гуццин Г. А.** Пространственное взаимодействие струй, распространяющихся в спутном сверхзвуковом потоке.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1972, № 6.
8. **Гогиш Л. В.** Релаксационные колебания в турбулентном ближнем следе.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1969, № 6.
9. **Лютый В. А., Новиков Л. В., Швец А. И.** Пульсации давления в кольцевых соплах.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1973, № 5.
10. **Шлягун А. Н.** Влияние боковой державки модели конус — цилиндр на характер изменения донного давления при взаимодействии реактивной струи со сверхзвуковым набегающим потоком.— «Учен. зап. ЦАГИ», 1971, т. 2, № 2.
11. **Авдеевский В. С., Иванов А. В., Каршман И. М., Трасковский В. Д., Юделович М. Я.** Течение в сверхзвуковой вязкой недорасширенной струе.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1970, № 3.