

УДК 533.6.011.35

© 1994 г. С. В. ЯГУДИН

## ЗАПИРАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В СУЖАЮЩИХСЯ СОПЛАХ И ИХ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлены результаты расчетно-теоретического исследования локальных и интегральных характеристик сужающихся сопел. Показано, что автомодельное (запертое) течение в сопле, когда расход газа не зависит от внешнего давления, может иметь место при докритических значениях степени понижения давления  $\lambda$ . Если контур сопла состоит из контура конического сопла и сужающегося участка границы струи, истекающей из него, то такое сопло в некотором диапазоне  $\lambda$  имеет более высокий коэффициент тяги, чем исходное коническое.

Сужающиеся сопла широко используются в прикладной аэродинамике и в силовых установках летательных аппаратов. Условно их можно разделить на три группы. Первая группа — сопла с равномерным звуковым потоком на выходе, или идеальные звуковые сопла. К настоящему времени разработаны различные методы профилирования таких сопел путем решения прямой и обратной задач, которые позволяют получать сравнительно пологие, крутые, а также сильно искривленные контуры [1—4]. Вторая группа — сопла с существенно неравномерным течением на выходе с выпуклыми наружу или прямолинейными контурами. В третью группу входят сопла с выпуклыми внутрь контурами. Течения в выходных сечениях таких сопел в соответствии с выбранным условием разделения неравномерные, хотя могут быть и близкими к равномерным.

Выбор формы сопла и закона его регулирования основывается на анализе его интегральных характеристик. Расчет их достаточно прост, если известны условия образования и сохранения запертого течения.

Вопрос о запираии течения в идеальных звуковых соплах не вызывает затруднений. Запирание течения в соплах второй группы происходит качественно так же, как в сопле с прямолинейным сужающимся контуром, которое часто называют коническим (как в осесимметричном, так и в плоском случаях). Истечение газа из конического сопла изучалось теоретически, численно и экспериментально многими авторами (см. например, [4—12] и библиографию в [10—11]). Схема запираии течения в коническом сопле хорошо известна (например, [4—6]) и использовалась в [8, 9] при доказательстве неравенств для интегральных характеристик сужающихся сопел. Использование этой схемы, строго говоря, не дает оснований считать, что эти неравенства без оговорок применимы к соплам третьей группы, поскольку течение в них запирается не так, как в коническом сопле. На последнее обстоятельство обращено внимание при численном исследовании расходных характеристик сужающихся сопел в [7]. Результаты расчетов показали, что скругление контура сужающегося сопла около выходного сечения по дуге окружности приводит на докритических режимах к возникновению сверхзвуковой зоны около стенки перед выходом. В этом случае формирование звуковой линии происходит не с кромки, как в коническом сопле на сверхкритических режимах, а с криволинейной части контура, как в сопле Лавала при переходе от течения Тейлора к течению Мейера [4].

Целью настоящей работы является исследование запираания течения в соплах третьей группы и их интегральных характеристик.

1. Контуры идеальных звуковых сопел профилируются таким образом, чтобы при критическом значении степени понижения давления

$$\pi_c = \pi_*, \quad \pi_c = \frac{p_0}{p_\infty}, \quad \pi_* = \frac{p_0}{p_*} = \left( \frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\kappa/(\kappa-1)}$$

( $p_0$  — полное давление газа,  $p_\infty$  — давление покоящейся среды,  $\kappa$  — отношение удельных теплоемкостей газа) поток на выходе был равномерным с числом Маха  $M = 1$ , т. е. условием профилирования определено, что запираание течения происходит при  $\pi_c = \pi_*$ . При  $\pi_c \geq \pi_*$  имеем

$$\mu = \frac{G}{G_*} = 1, \quad \Gamma = \frac{I}{I_*} = 1, \quad G = \int \rho u dF, \quad I = \int (p + \rho u^2) dF$$

где расход  $G$  и импульс  $I$  определяются интегрированием по выходному сечению сопла с площадью  $F$ ; индексом «\*» отмечены величины, определяемые по критическим параметрам течения;  $p$ ,  $\rho$ ,  $u$  — давление, плотность и  $x$ -компонента скорости. Коэффициент тяги сопла  $P^*$  (отношение действительной тяги  $P$  к идеальной тяге  $P_i$ , вычисленной по действительному расходу) определяется по формуле

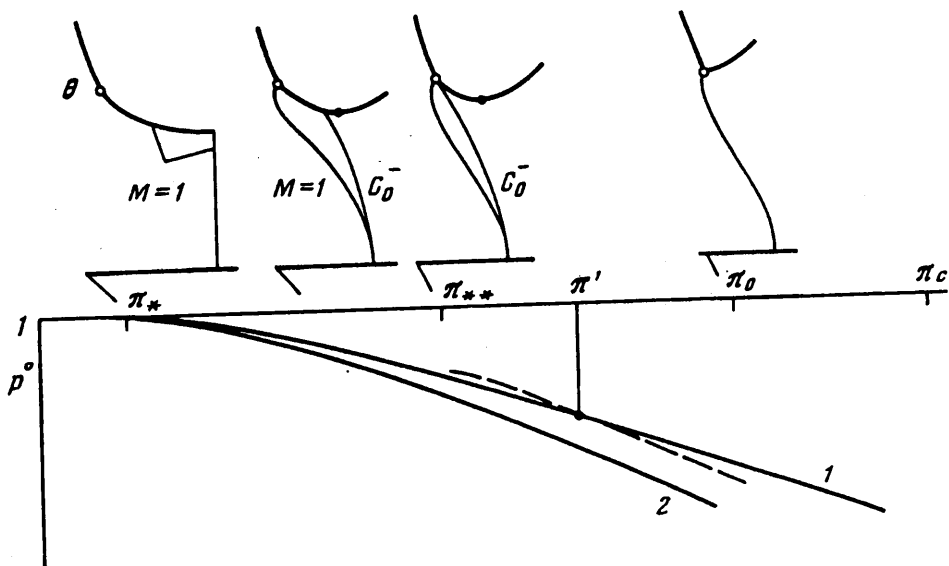
$$P^* = \frac{P}{P_i} = \frac{P}{GV_i} = \frac{I - p_\infty F}{Gu_* \lambda_1}, \quad \lambda_1 = \sqrt{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} (1 - \pi_c^{(1-\kappa)/\kappa})} \quad (1.1)$$

где  $V_i$  — идеальная,  $u_*$  — критическая, а  $\lambda_1$  — приведенная скорости. Отметим, что в ряде работ, пользуясь понятием удельной тяги  $P/G$ , коэффициент тяги  $P^*$  называют коэффициентом удельной тяги (отношением удельной тяги  $P/G$  действительного сопла к удельной тяге идеального сопла, которая равна  $V_i$ ).

При докритических значениях  $\pi_c < \pi_*$  течение в выходном сечении идеального звукового сопла с касательной к контуру, параллельной оси  $x$ , можно считать равномерным (на основании работы [13], где исследовалось, в частности, сопло Витошинского). В этом случае коэффициенты расхода и импульса легко определяются по известным изоэнтропическим формулам. Если же в выходном сечении идеального звукового сопла имеется некоторая неравномерность (что возможно, поскольку существуют сопла с зоной сверхзвукового изоэнтропического течения около стенки перед минимальным сечением с  $M = 1$  [3, 4]), то течение в струе под воздействием постоянного давления внешней среды должно выровниться вниз по потоку при  $x \rightarrow \infty$  (как при истечении струи из конического сопла). В любом случае условие существования сечения с равномерным течением достаточно для утверждения, что  $P^* = 1$ . Действительно, рассмотрим сопло, контур которого состоит из контура идеального звукового сопла и границы струи вплоть до сечения с равномерным течением. Тяга  $P$  такого сопла, с учетом того что течение в выходном сечении равномерное со скоростью, соответствующей внешнему давлению, равна  $GV_i$ , т. е. идеальной тяге, вычисленной по действительному расходу. Но контур струи вклада в тягу не дает, поэтому такую же тягу имеет и идеальное звуковое сопло, а значит,  $P^* = 1$ . При этом значения  $\mu$  и  $\Gamma$  не определены и их можно получить либо из расчетов, либо из эксперимента.

Приведем нужные для дальнейшего основные положения схемы запираания течения в коническом сопле [4] при изменении внешнего давления и фиксированных полных параметрах газа на входе в сопло. При  $\pi_c = \pi_*$  (фиг. 1) скорость в струе становится равной скорости звука на ее границе и вниз по потоку от сечения, удаленного от выходного на расстояние, которое зависит от угла сужения  $\theta$ .

При увеличении  $\pi_c$  под воздействием волн разрежения, исходящих с кромки



Фиг. 1

сопла и от границы струи, звуковая линия искривляется и смещается вверх по потоку. При этом вверх по потоку смещается и предельная характеристика второго семейства  $C_0^-$ , идущая от границы струи и попадающая в центр сопла (в точку на оси  $x$ , в которой  $M = 1$ ). При  $\lambda_c = \lambda_{**}$  другой конец  $C_0^-$  оказывается на кромке и течение запирается, поскольку последующие волны разрежения с кромки и от границы струи проходят правее  $C_0^-$  и не могут изменить расход газа через сопло и его импульс. Граница струи сужается до точки  $M$ , а затем начинает расширяться. При дальнейшем увеличении  $\lambda_c$  увеличивается веер волн разрежения с кромки.

Введем значение  $\lambda_0$ , соответствующее повороту вектора звуковой скорости в угловой точке на угол  $\theta$ . При значениях  $\lambda_c < \lambda_0$  поперечные сечения начального участка струи меньше выходного сечения сопла.

В [5] исследовались характеристики осесимметричных сопел с углами сужения  $\theta = 15, 25$  и  $40^\circ$ , а также контрольного сопла с плавным контуром в виде дуги окружности около минимального сечения.

Выводы [5] о том, что «конические сопла имеют более высокий коэффициент тяги, чем контрольное сопло» и что «с увеличением угла сужения сопла тяга увеличивается», оказались неожиданными и вызвали дискуссию специалистов [5]. В [8] было теоретически доказано, что «двумерность течения, уменьшая расход, увеличивает удельный импульс»:  $i/i_* > 1$  ( $i = I/G$ ). В [9] доказано, что «на сверхкритических режимах сужающееся сопло с существенно неравномерным потоком на выходе имеет более высокую тяговую характеристику по сравнению с профилированным соплом (при равных расходах газа). В [12] сделан вывод о том, что «наиболее рациональным следует считать сопло с  $\theta = 90^\circ$ , имеющим при том же максимальном значении коэффициентов удельной тяги, что и у сопел с  $30^\circ < \theta < 90^\circ$ , минимальную длину». Такой результат был получен при сравнении тяговых характеристик (зависимостей коэффициента тяги  $P^0$  от  $\lambda_c$ ) осесимметричных сопел, различающихся лишь углами сужения  $\theta$ . Участки тяговых характеристик при  $\lambda_c \geq \lambda_{**}(\theta)$  рассчитывались по значениям  $\mu$  и  $i/i_*$  на запертом режиме, которые получены в основном в [11].

Для продолжения зависимостей  $P^0$  в сторону меньших значений  $\lambda_c < \lambda_{**}$  требуются численные расчеты истечения струй. В [12] сделано предположение, что если соединить значения  $P^0(\theta, \lambda_{**})$  для сопел с различными  $\theta$  при соответствующих им значениях  $\lambda_{**}$ , то получится единая (для

семейства сопел с одинаковым значением радиуса входного участка  $y_0$ ) кривая, приближенно описывающая изменение коэффициента тяги  $P^*$  на незапертых режимах  $\lambda_c < \lambda_{**}(\theta)$ . Для подтверждения предположения были приведены результаты контрольного расчета характеристик сопла с  $\theta = 90^\circ$  при  $\lambda_c = 11,9$ . Используя их, нетрудно оценить, что предположение выполняется с точностью 0,1%.

Подмеченные в [12] закономерности изменения тяговых характеристик осесимметричных сопел с углами сужения до  $90^\circ$  и значениями ординаты цилиндрического участка на входе  $y_0 = 2$  (здесь и далее за единицу длины принят радиус или полувысота выходного сечения конического сопла), как показали результаты расчетов настоящей работы, приближенно выполняются и при других  $y_0$ , а также в плоском случае. При этом тяговые характеристики плоских сопел оказываются несколько ниже, чем осесимметричных с такими же контурами (но не более чем на 0,2—0,3%). Уменьшение поджатия сопла от  $y_0 = 2$  до 1,5 приводит к незначительному снижению значений  $P^*$  (около 0,1%).

2. Анализируя процесс запираания течения в коническом сопле, можно выделить фактор адаптации струи к внешним условиям. Этот фактор отражает доказанный теоретически [9] и подтверждаемый при численных расчетах вывод о том, что на сверхкритических режимах ( $\lambda_c > \lambda_*$ ) тяговая характеристика конического сопла с  $\theta \neq 0$  (линия 1 на фиг. 1) выше тяговой характеристики идеального звукового сопла (линия 2). Действительно, если часть границы струи, истекающей из конического сопла при значении  $\lambda_c$ , вплоть до сечения с  $M = 1$  принять в качестве стенки («заморозить»), то получится сопло с предельным течением Чаплыгина — одно из семейств идеальных звуковых сопел (расчету контура такого сопла посвящена, например, работа [1]).

При  $\lambda_c = \lambda_*$  минимальное сечение струи из конического сопла совпадает с выходным сечением такого идеального звукового сопла. Совпадают при этом и равны единице значения коэффициентов тяги конического сопла и идеального звукового. При увеличении  $\lambda_c$  течение в струе из конического сопла адаптируется к новым условиям, граница струи отклоняется вверх, ее минимальное сечение увеличивается и тяговая характеристика конического сопла оказывается выше тяговой характеристики идеального звукового, единой для всех идеальных звуковых сопел, а значит, и для сопла с замороженным участком границы струи.

Возникает вопрос, что будет, если заморозить до минимального сечения границу струи, истекающую из конического сопла при более высоком значении  $\lambda_c = \lambda' = p_0/p_\infty'$  из интервала  $\lambda_0 > \lambda' > \lambda_*$ , и как будет выглядеть тяговая характеристика сопла с таким контуром по сравнению с тяговой характеристикой конического? Ясно, что при  $\lambda_c = \lambda'$  коэффициенты тяги этих сопел совпадают, т. е. тяговые характеристики  $P^*(\lambda_c)$  имеют общую точку. Ниже доказано, что в этой точке тяговая характеристика сопла с замороженным участком границы струи (штриховая линия на фиг. 1) пересекается с тяговой характеристикой конического сопла.

Коэффициент тяги сопла с замороженным при  $\lambda_c = \lambda'$  участком границы струи до точки  $M$  в минимальном сечении с площадью  $F$  определяется по формуле (1.1). Параметры газа в его выходном сечении, а следовательно, и величины  $I$  и  $G$  остаются неизменными не только при любых  $\lambda_c > \lambda'$ , что очевидно, но и при некоторых меньших значениях  $\lambda_c < \lambda'$ , при которых скачок уплотнения от границы струи в точке  $M$  является присоединенным, и возмущения внешней среды внутрь сопла не передаются. Уточним, что увеличение внешнего давления приводит к отклонению границы струи вниз и возникновению сначала присоединенного в точке  $M$  скачка уплотнения, а затем — отошедшего, когда импульс уже не сохраняется, тогда как расход может оставаться прежним.

Пусть значение  $\lambda'$  таково, что расход газа  $G$  через коническое сопло мак-

симальный ( $\pi' \geq \pi_{**}$ ), а значения  $\pi_c$  такие (они могут быть и меньше  $\pi_{**}$ ), что  $I$  и  $G$  остаются неизменными (импульс  $I_K$  в сечении среза конической части сопла с площадью  $F_K$  при этом заведомо сохраняется). Тогда, учитывая, что  $I$  и  $I_K$  связаны соотношением  $I = I_K - p_\infty'(F_K - F)$ , формулу (1.1) можно записать так

$$P^\circ = \frac{I_K - p_\infty' F_K}{G u_* \lambda_1} + \delta P^\circ, \quad \delta P^\circ = \frac{(p_\infty - p_\infty')(F_K - F)}{G u_* \lambda_1} \quad (2.1)$$

Первое слагаемое — коэффициент тяги конического сопла, второе  $\delta P^\circ$  — разность коэффициентов тяги сопла с замороженным участком границы струи и конического.

На основе анализа формулы (2.1) можно заключить следующее.

1. При  $\pi_c > \pi'$  значения коэффициента тяги конического сопла выше, чем у сопла с замороженным участком границы струи. Этот вывод справедлив в пределах правомерности формулы (2.1), т. е. при ограничении  $\pi' \geq \pi_{**}$ . Но если учесть, что коэффициент тяги конического сопла выше, чем идеального звукового, начиная с критического значения  $\pi_*$  [9] (фиг. 1), то, выбирая в качестве идеального звукового сопла сопло с замороженным участком границы струи, истекающей из конического при значении  $\pi_*$ , последнее ограничение в силу непрерывности можно снять. При уменьшении  $\pi'$  до  $\pi_*$  контур сопла с замороженной границей стремится к контуру идеального звукового. Таким образом, при  $\pi_c > \pi'$  тяговая характеристика сопла с замороженной границей лежит между тяговыми характеристиками конического и идеального звукового.

2. Если  $\pi' > \pi_{**}$ , то всегда существуют такие значения  $\pi_c < \pi'$ , при которых параметры газа в выходном сечении сопла с замороженным участком границы струи не меняются и формула (2.1) верна. При таких значениях  $\pi_c$  скачок уплотнения в точке  $M$  является присоединенным, а  $\delta P^\circ > 0$ , т. е. сопло с замороженным участком границы струи имеет более высокие значения  $P^\circ$ , чем коническое сопло (фиг. 1).

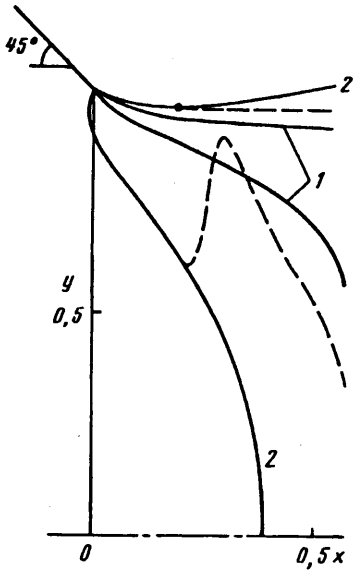
Если участок замораживания границы струи, истекающей из конического сопла при  $\pi' > \pi_{**}$ , постепенно увеличивать, начиная от кромки, то при  $\pi_c = \pi'$  отклонение касательной к тяговой характеристике такого сопла от касательной к тяговой характеристике конического сопла сначала увеличивается. Но после достижения максимума (при замораживании границы до минимального сечения) — уменьшается до нуля (если граница замораживается до сечения с площадью, равной площади выходного сечения конического сопла).

3. При  $\pi' \rightarrow \pi_0$   $\delta P^\circ \rightarrow 0$ .

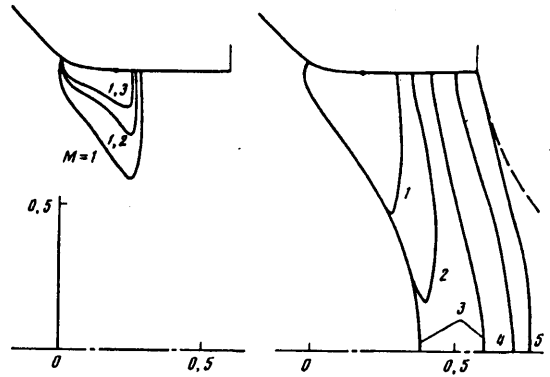
В случаях, когда присоединенный скачок уплотнения в точке  $M$  невозможен, или при  $\pi_c \leq \pi' < \pi_{**}$ , когда расход через сопло не максимальный, формула (2.1) теряет силу, соотношение между коэффициентами тяги конического сопла и сопла с замороженной границей получено численным расчетом. Коэффициент тяги определялся по формуле (1.1) с использованием способа уточнения интегральных характеристик [14, 15].

3. Численные исследования характеристик сужающихся сопел проводились с помощью модифицированного варианта программы, применявшейся в [14]. Изменение программы в основном сводилось к тому, чтобы можно было рассчитывать течения на нерегулярных сетках, учитывающих особенности течения (с трех- и четырехугольными ячейками). Использовался метод установления с конечно-разностной схемой Годунова — Колгана, которая на адаптированных сетках позволяет получать достаточно точные решения [11]. Принималось, что газ идеальный (невязкий, нетеплопроводный) и совершенный со значением  $\kappa = 1,4$ , а течение его — безотрывное.

Контур конического сопла состоял из цилиндрического участка с радиусом



Фиг. 2



Фиг. 3

$y_0 = 2$ , дуги окружности радиуса  $r = 0,5$  и плавно сопряженного с ней прямолинейного отрезка с углом сужения  $\theta$ .

На фиг. 2 приведены звуковые линии и границы струй, полученные при расчетах сопла с  $\theta = 45^\circ$  ( $\kappa_{**} \approx 6,3$ ) при квазистационарном переходе от режима с  $\kappa_c = 2$  к режиму с  $\kappa_c = 4$  (прямой ход). Кривые 1 соответствуют  $\kappa_c = 2$ . После установления решения при  $\kappa_c = 4$  (кривые 2) часть границы струи до точки  $M$  в минимальном сечении замораживалась (фиксировался контур и ставилось условие непротекания) и счет продолжался, но уже при последовательном уменьшении  $\kappa_c$  на единицу (обратный ход). При  $\kappa_c = 3$  течение в сопле остается запертым, звуковая линия такая же, как и при  $\kappa_c = 4$ . Граница струи и звуковая линия при  $\kappa_c = 2$  показаны штриховыми линиями. Форма звуковой линии при  $\kappa_c = 2$  свидетельствует о том, что около криволинейного участка контура существует зона сверхзвукового течения.

Проведены расчеты течения в сопле с замороженным участком границы струи и при прямом ходе, когда течение в сопле, соответствующее начальному одномерному приближению, перестраивалось в соответствии с значением  $\kappa_c$ , которое вначале задавалось равным 2, а затем последовательно увеличивалось. Результаты расчетов при прямом ходе практически такие же, как и при обратном, и свидетельствуют о том, что запираение течения происходит с образованием около замороженной границы зоны интенсивного ускорения течения и последующего его торможения. В результате этого переход к такому же течению, как и в коническом сопле при  $\kappa_c = 4$ , происходит «быстрее», при меньших  $\kappa_c$ , т. е. введение излома и криволинейного участка контура перед выходным сечением приводит к «ускорению» процесса запираения течения и смещению момента запираения в сторону меньших значений  $\kappa_c$ .

Особенно заметно это проявляется в тех случаях, когда к сужающемуся участку контура пристыковывается цилиндрический (фиг. 3, длина цилиндрического участка 0,4). При  $\kappa_c = 1,65$ , как видно из поля линий  $M = \text{const}$ , течение в таком сопле, исключая небольшую область около криволинейной стенки, дозвуковое. Затем  $\kappa_c$  было увеличено до 1,7. После того как увеличивающаяся при счете сверхзвуковая зона касается оси, ограничивающая эту зону линия  $M =$

$\lambda_c = 1$  делится на две. Левая линия, ограничивающая дозвуковое течение слева от нее, соответствует звуковой линии при запертом течении. Правая линия, ограничивающая дозвуковое течение справа, при счете смещается вниз по потоку, устанавливая течение, соответствующее запертому режиму. При увеличении  $\lambda_c$  до 1,8 звуковая линия смещается в положение, отмеченное цифрой 5, а при  $\lambda_c = 1,9$  течение на начальном участке струи сверхзвуковое (штриховая линия соответствует  $M = 1,1$ ).

При обратном ходе процесс развивается в обратном порядке: образуется фронт сжатия и начинает двигаться против потока. В результате «взаимодействия» его со звуковой линией внутри сопла остается языкообразная сверхзвуковая зона около криволинейного участка,

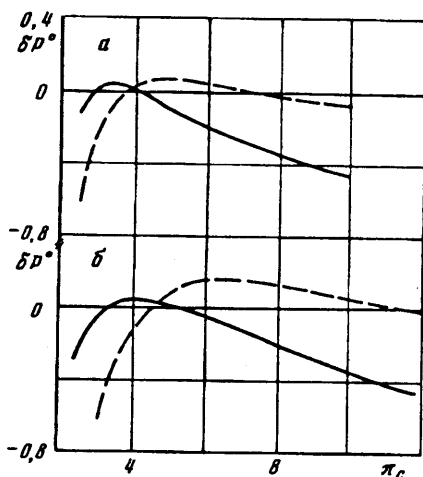
Качественно такие же особенности течения получены в расчетах плоских и осесимметричных сопел с углами сужения до  $90^\circ$  и с криволинейным участком перед выходным сечением как в виде границы струи, так и в виде дуги окружности, плавно сопряженной с сужающимся отрезком прямой. Цилиндрический участок перед выходным сечением приводит к значительному смещению момента запирания течения в сторону меньших значений  $\lambda_c$  и при нулевой длине криволинейного участка (т. е. в коническом сопле с цилиндрическим насадком). Это позволяет по известным значениям  $\mu$  и  $\Gamma$  для сопла без насадка на запертом режиме (при  $\lambda_c \geq \lambda_{**}$ ) рассчитывать по формуле (1.1) значения коэффициента тяги для сопла с цилиндрическим насадком и при меньших значениях  $\lambda_c < \lambda_{**}$ , но с такими же  $\mu$  и  $\Gamma$  (очевидно, что при  $\lambda_c \geq \lambda_{**}$  коэффициент тяги сопла с цилиндрическим насадком такой же, как и без него).

Если цилиндрический участок достаточно протяженный, то в конце его поток можно считать равномерным. Приравняв расход такого потока к максимальному расходу через сопло без цилиндрического участка и полагая течение изэнтропическим, из полученного уравнения можно получить два возможных значения числа  $M$  в конце цилиндрического участка, соответствующих до- и сверхзвуковому течению. Эти значения, как показали результаты расчетов, при  $\theta < 60^\circ$  приближенно соответствуют изменениям режима течения в сопле. При  $\theta > 60^\circ$  такая упрощенная схема становится непригодной из-за неучета возрастающих потерь полного давления в канале.

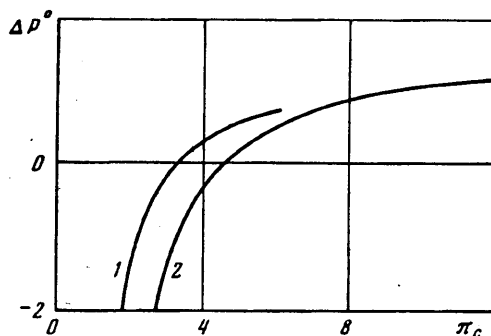
Полученные результаты позволяют заключить, что запираание течения (при увеличении  $\lambda_c$ ) или разрушение запертого течения (при уменьшении  $\lambda_c$ ) в общем случае зависят от формы всей сужающейся части сопла. Если контур сопла вызывает ограничение расхода (содержит излом или сильно искривленный, выпуклый внутрь участок перед выходом), то течение может быть запертым при докритических значениях  $\lambda_c$ .

Примем за линию отсчета тяговую характеристику конического сопла. При  $\theta = 45^\circ$  отличия от нее (в долях %) тяговых характеристик сопел с участком границы струи, замороженным до минимального сечения при значениях  $\lambda' = 4$  и 7, показаны на фиг. 4, а сплошной и штриховой кривыми. Аналогичные результаты получаются и при увеличении угла сужения (фиг. 4, б, прямая  $\delta P^* = 0$  соответствует коническому соплу с  $\theta = 90^\circ$ , сплошная и штриховая кривые — соплам с участками границ струй, замороженными при  $\lambda' = 5$  и 11, 9). Эти и следующие из формулы (2.1) результаты позволяют заключить, что сопла с контурами, составленными из контура конического сопла и участка границы струи, истекающей из него при значении  $\lambda'$ , имеют в некотором диапазоне  $\lambda_c < \lambda'$  более высокие значения коэффициента тяги, чем коническое сопло. При сравнительно низких значениях  $\lambda_c$  обтекание излома или криволинейного выпуклого в сторону потока участка контура перед выходным сечением происходит с образованием местной сверхзвуковой зоны и с перерасширением потока, что приводит к потерям тяги.

Потери тяги на перерасширение потока значительны в конических соплах с



Фиг. 4



Фиг. 5

цилиндрическими насадками. На фиг. 5 приведены отличия  $\Delta P^\circ$  коэффициентов тяги плоских сопел с  $\theta = 30$  и  $60^\circ$  и цилиндрическими насадками (кривые 1 и 2) от коэффициента тяги идеального звукового сопла (прямая  $\Delta P^\circ = 0$ ). Коэффициент тяги сопла с  $\theta = 30^\circ$  при  $\pi_c < 3,3$  из-за перерасширения потока меньше коэффициента тяги идеального звукового сопла. При увеличении  $\theta$  диапазон с отрицательными  $\Delta P^\circ$  увеличивается. Приравняв коэффициент тяги сопла с цилиндрическим насадком коэффициенту тяги идеального звукового сопла, получим формулу для определения значений  $\pi_*$  при  $\Delta P^\circ = 0$

$$\pi_* = \frac{1}{2} \left( \frac{\kappa + 1}{2} \right)^{1/(\kappa-1)} \frac{(1 - \mu)}{(\Gamma^\circ - \mu)}$$

Здесь  $\mu$  и  $\Gamma^\circ$  — значения коэффициентов расхода и импульса сопла без насадка на закрытом режиме. Из этой формулы с учетом данных [11] следует, что увеличение  $\theta$  в осесимметричном сопле с цилиндрическим насадком от  $30$  до  $60^\circ$  приводит к увеличению значений  $\pi_*$  от 3 до 4,4.

Таким образом, увеличение  $\theta$  в конических соплах с цилиндрическими насадками приводит в интересном для практики диапазоне  $\pi_c$  к ухудшению тяговых характеристик, т. е. к выводу, прямо противоположному выводу работ [5, 12] для конических сопел.

В заключение заметим следующее. Струя, истекающая из конического сопла при  $\pi_{**} \leq \pi_c < \pi_0$ , сначала сужается до точки  $M$ , а затем расширяется (фиг. 1). Если замораживать границу до  $y_0 = 1$  (т. е. до сечения с площадью, равной площади выходного сечения конического сопла), то получаются сужающиеся-расширяющиеся сопла с относительной площадью выходного сечения  $F_K^\circ = F_K/F_M$ .

Участки тяговых характеристик таких сопел при  $\pi_c \geq \pi_{**}$  одинаковы и совпадают с соответствующим участком тяговой характеристики конического сопла. На этом участке коэффициент тяги выше, чем идеального звукового сопла, для которого  $F_K^\circ = 1$ . Но если его сравнить с коэффициентом тяги идеального сверхзвукового сопла (при одинаковых значениях  $F_K^\circ > 1$ ), то результат в общем случае зависит от  $F_M$  и оказывается прямо противоположным при наименьшем значении  $F_M$ , т. е. в случае сопла с участком границы, замороженным при значении  $\pi_{**}$ .

С другой стороны, при сравнении тяговых характеристик конических сопел с разными  $\theta$  происходит неясное сравнение тяговых характеристик сужающихся-расширя-



ющихся сопел с различными значениями  $F_K^\circ$ , но характеристики последних принято сравнивать при одном и том же значении  $F_K^\circ$ . Таким образом, вопрос о сравнении тяговых характеристик сужающихся сопел неоднозначен.

Известно также, что локальные и интегральные характеристики сопел, особенно сужающихся, могут зависеть от условий внешней среды (т. е. от того, происходит истечение струи из сопла в покоящуюся среду или во внешний до- или сверхзвуковой поток). Поэтому вывод о наиболее рациональной форме сужающегося сопла может быть сделан лишь при учете всех сил, действующих на его внутренние и внешние контуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подсыпанина Н. А., Шифрин Э. Г. Об одном методе профилирования коротких плоских сопел//Изв. АН СССР. МЖГ. 1975. № 1. С. 54—58.
2. Подсыпанина Н. А., Шифрин Э. Г., Шулаков М. А. О возможности безотрывного течения в сопле с сильно изогнутыми стенками//Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 5. С. 188—189.
3. Мельникова Д. А., Пирумов У. Г., Сергиенко А. А. Сопла реактивных двигателей//Аэромеханика и газовая динамика. М.: Наука, 1976. С. 57—75.
4. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Течения газа в соплах. М.: Изд-во МГУ, 1978. 351 с.
5. Торнок, Браун. Экспериментальное исследование течения вязкой жидкости в сужающихся конических соплах и сравнение с теоретическими результатами//Тр. Америк. о-ва инж.-мех. Теор. основы инж. расчетов. 1972. Т. 94. № 4. С. 234—241.
6. Fenain M., Dutouquet L., Solignac J.-L. Calcul des performances d'une tuyere propulsive convergente. Comparaison avec l'expérience//Rech. Aerospatiale. 1974. № 5. P. 261—276.
7. Соколов В. Д., Ягудин С. В. Коэффициент расхода осесимметричных сужающихся сопел с произвольным контуром//Уч. зап. ЦАГИ. 1975. Т. 6. № 1. С. 117—121.
8. Крайко А. Н., Соколов В. Е. Об удельном импульсе потока в минимальном сечении сопла Лаваля и в выходном сечении сужающегося сопла//Изв. АН СССР. МЖГ. 1976. № 1. С. 186—188.
9. Щербаков С. А. О тяге сужающегося сопла//Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 6. С. 181—183.
10. Косолапов Ю. С., Сивобород В. А. Расчетно-теоретическое исследование истечения газа из плоских щелей и осесимметричных отверстий//Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 2. С. 109—115.
11. 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.
12. Тагиров Р. К. Определение удельной тяги на незапертых режимах и построение безотрывного контура сужающегося сопла//Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 1. С. 158—164.
13. Быркин А. П., Пономарев С. П., Кудрявцева Л. И. Исследование течения газа в коллекторах (соплах) аэродинамических труб малых дозвуковых и околозвуковых скоростей//Уч. зап. ЦАГИ. 1987. Т. 18. № 2. С. 117—123.
14. 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.
15. 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.