

РАСЧЕТ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО ДВУХПОЗИЦИОННОГО СОПЛА

Валерий Яковлевич ХИЛЬКЕВИЧ родился в 1950 г. в городе Нижнем Тагиле Свердловской области. Ведущий инженер-конструктор ОАО ТМКБ «Союз». Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области математического моделирования рабочих процессов в комбинированных прямоточных воздушно-реактивных двигателях на твердых и жидких топливах. Автор более 30 научных работ. E-mail: lythilkevich@yandex.ru

Valery Ya. HILKEVICH, Ph.D., was born in 1950, in the Sverdlovsk Region. He is a Principal Design Engineer at the Turayevo Engineering Design Bureau "Soyuz". His research interests are in mathematical modeling of working processes in solid-propellant and liquid-propellant ramjets. He has published over 30 technical papers. E-mail: lythilkevich@yandex.ru

Разработана математическая модель регулируемого двухпозиционного сопла прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) на жидком топливе. Проведен демонстрационный расчет работоспособности сопла как в закрытом, так и в открытом положении.

A mathematical model is suggested for adjustable two-position nozzles intended to liquid fuel ramjets. An example is solved to demonstrate operability of the nozzle both in closed and open positions.

Ключевые слова: математическое моделирование, ПВРД, жидкое топливо, регулируемое сопло.

Key words: mathematical modeling, ramjet, liquid fuel, adjustable nozzle.

Регулирование площади критического сечения сопла ПВРД позволяет совместить рабочую точку на дроссельной характеристике воздухозаборного устройства (ВЗУ) с угловой точкой (точкой максимальной эффективности работы ВЗУ) на всей траектории полета, тем самым улучшая летно-технические характеристики ЛА (дальность полета и др.). Однако использование непрерывного регулирования площади критического сечения (всережимного регулируемого сопла) требует специального привода с источником энергии и системой управления. Введение в конструкцию ПВРД дополнительных конструктивных элементов и систем приводит к увеличению массы, а также к снижению надежности двигательной установки (ДУ).

Опыт и расчетные исследования показывают, что использование всережимного сопла ПВРД в большинстве случаев нецелесообразно. В ОАО ТМКБ «Союз» было разработано регулируемое двухпозиционное сопло (РДС), которое успешно используется на ряде изделий, оснащенных ПВРД на жидком топливе. Применение более простой конструкции РДС с дискретным переключением режимов (с максимальной площади критического сечения на минимальную и наоборот) уже дает

существенное улучшение летно-технических характеристик летательного аппарата (ЛА) по сравнению с нерегулируемым соплом, хотя бы потому, что переключение сопла с открытого на закрытое положение при разгоне ЛА позволяет предотвратить переход рабочей точки на дроссельной характеристике ВЗУ на горизонтальную ветвь и тем самым избежать очень неэкономичного режима работы ВЗУ с «отшедшей ударной волной». Вместе с тем применение РДС не требует использования дополнительных источников энергии, и управление им осуществляется простым закрытием или открытием заслонки.

Цель проведенного исследования — разработка методики расчета РДС и определение критериев его работоспособности.

Кинематическая схема регулируемого двухпозиционного сопла приведена на рис. 1. Она включает в себя две створки сопла («дозвуковую» AMB и «сверхзвуковую» CNB) и ползунок, которые между собой и камерой сгорания соединены шарнирами A , B , C . Отрезки BM и BN равны между собой и перпендикулярны отрезкам AM и CN . Число створок в окружном направлении $n = 20$. Перемещения ползунка ограничены осевым направлением. Кроме того, у ползунка имеются два ограничителя

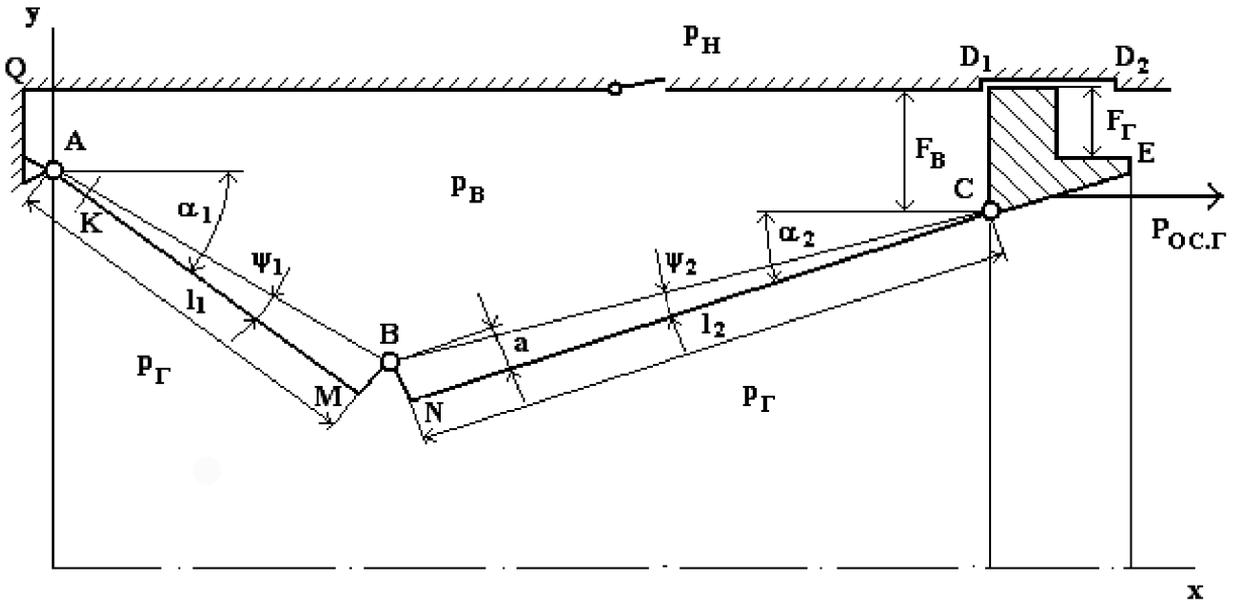


Рис. 1. Кинематическая схема РДС

при движении в осевом направлении D_1 и D_2 , которые соответствуют положениям закрытого ($D_{кр} = 305$ мм) и открытого ($D_{кр} = 326$ мм) сопла.

Отметим, что разрыв профиля сопла MBN в районе критического сечения используется только в кинематической схеме РДС при расчете равновесия створок сопла. В газодинамическом расчете, при определении распределения давления по образующим створок сопла используется реальный профиль. При закрытом сопле точки M и N соединены дугой окружности с центром в точке B , которую формирует шарнир. При открытом сопле точки M и N практически сливаются друг с другом.

Регулирование сопла осуществляется управляющим давлением воздуха p_B в межстворочной полости $AMBNCQ$. Воздух (низкотемпературные продукты сгорания с высоким значением коэффициента избытка воздуха) отбирается из газодинамического тракта двигателя в области «завесы» и через отверстия в «дозвуковой» створке K подается в межстворочную полость. Кроме того, перетекание воздуха из области «завесы» в межстворочную полость и обратно может происходить в шарнирных соединениях, а также по длине «дозвуковых» и «сверхзвуковых» створок через зазоры между соседними створками, состыкованными в окружном направлении. На противоположные стороны створок и ползунка (относительно межстворочной полости) действует переменное давление движущегося по соплу газа p_G . Межстворочная полость имеет заслонку, при открытии которой происходит сравнение давления из полости в окружающую среду с давлением p_H и переключение режимов работы сопла (закрытое сопло — открытое сопло).

Назовем давлениями страгивания для закрытого $p_{в.с1}$ и открытого $p_{в.с2}$ положений сопла управляющие давления, при которых осевые реакции в точках D_1 и D_2 равны 0. Тогда условие работоспособности РДС можно записать в виде

$$p_{в.п1} \geq p_{в.с1} \text{ (для закрытого сопла);} \tag{1}$$

$$p_{в.п2} \leq p_{в.с2} \text{ (для открытого сопла),}$$

где $p_{в.п1}$, $p_{в.п2}$ — располагаемые управляющие давления при закрытом и открытом сопле, которые устанавливаются в межстворочной полости при балансе прихода и расхода.

Определим давления страгивания $p_{в.с1}$ и $p_{в.с2}$. Полагаем, что давление в полости MBN постоянно и равно $(p_{ГМ} + p_{ГN})/2$, где $p_{ГМ}$, $p_{ГN}$ — давления на «дозвуковой» и «сверхзвуковой» створках в точках M и N .

В шарнирах B и C возникают реакции B_x , B_y , C_x , C_y . Запишем уравнения равновесия (уравнения моментов) для «дозвуковой» и «сверхзвуковой» створок сопла относительно точек A и C соответственно:

$$B_y \cos(\alpha_1 - \psi_1) + B_x \sin(\alpha_1 - \psi_1) = \frac{-(M_1 + M_{a1}) + p_B(m_1 + m_{a1})}{\sqrt{l_1^2 + a^2}},$$

$$-B_y \cos(\alpha_2 - \psi_2) + B_x \sin(\alpha_2 - \psi_2) = \frac{-(M_2 + M_{a2}) + p_B(m_2 + m_{a2})}{\sqrt{l_2^2 + a^2}}, \tag{2}$$

где

$$\begin{aligned} M_1 &= \int_0^{l_1} p_{\Gamma} h_1(l) dl; \\ M_2 &= \int_0^{l_2} p_{\Gamma} h_2(l) dl; \\ M_{a1} &= (p_{\Gamma M} + p_{\Gamma N}) h_1(l_1) a^2 / 4; \\ M_{a2} &= (p_{\Gamma M} + p_{\Gamma N}) h_2(l_2) a^2 / 4, \end{aligned} \quad (3)$$

где $h_1(l)$, $h_2(l)$ — переменные по длине ширины «дозвуковой» и «сверхзвуковой» створок (длина створок исчисляется от точек A и C):

$$\begin{aligned} h_1(l) &= \frac{2\pi}{n} \left[y_A + (y_M - y_A) \frac{l}{l_1} \right]; \\ h_2(l) &= \frac{2\pi}{n} \left[y_C + (y_N - y_C) \frac{l}{l_2} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где y_A , y_M , y_C , y_N — радиальные координаты точек A , M , C , N .

Параметры, обозначенные малыми буквами m_1 , m_2 , m_{a1} , m_{a2} , вычисляются по формулам (3) при подстановке вместо p_{Γ} , $p_{\Gamma M}$ и $p_{\Gamma N}$ единицы:

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{\pi}{n} l_1^2 (y_A + 2y_M) / 3; \\ m_2 &= \frac{\pi}{n} l_2^2 (y_C + 2y_N) / 3; \\ m_{a1} &= \left(\frac{\pi}{n} \right) a^2 y_M; \\ m_{a2} &= \left(\frac{\pi}{n} \right) a^2 y_N. \end{aligned} \quad (5)$$

Решая систему уравнений (2), найдем реакцию B_x :

$$B_x = \frac{\cos(\alpha_2 - \psi_2) \frac{[-M_1 - M_{a1} + p_B (m_1 + m_{a1})]}{\sqrt{l_1^2 + a^2}} + \cos(\alpha_1 - \psi_1) \frac{[-M_2 - M_{a2} + p_B (m_2 + m_{a2})]}{\sqrt{l_2^2 + a^2}}}{\cos(\alpha_2 - \psi_2) \sin(\alpha_1 - \psi_1) + \cos(\alpha_1 - \psi_1) \sin(\alpha_2 - \psi_2)}. \quad (6)$$

Реакцию C_x найдем из уравнения равновесия «сверхзвуковой» створки сопла в проекциях на ось x :

$$C_x = -B_x + X_2 - X_{a2} - p_B (x_2 - x_{a2}), \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} X_2 &= \sin \alpha_2 \int_0^{l_2} p_{\Gamma} h_2(l) dl; \\ X_{a2} &= \cos \alpha_2 (p_{\Gamma M} + p_{\Gamma N}) h_2(l_2) a / 2; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{\pi}{n} l_2 (y_C + y_N) \sin \alpha_2; \\ x_{a2} &= \left(\frac{\pi}{n} \right) a y_N \cos \alpha_2. \end{aligned} \quad (9)$$

Давления страгивания для закрытого $p_{B,c1}$ и открытого $p_{B,c2}$ сопла определяются из уравнения равновесия ползунка при равенстве нулю реакций в точках D_1 и D_2 :

$$C_x n + p_B F_B + P_{oc,\Gamma} = 0, \quad (10)$$

где

$$P_{oc,\Gamma} = J_C - J_E - p_{\Gamma E} F_{\Gamma}. \quad (11)$$

Здесь J_C , J_E — импульсы в сечениях C и E ; $p_{\Gamma E}$ — давление в точке E (застойной зоне над ползунком).

Отметим, что в реальных конструкциях РДС для фиксации сопла в открытом положении используется не ограничитель движения ползунка в осевом направлении D_2 , а упор шарнира B в кольцо на обечайке камеры сгорания. В этом случае давление страгивания $p_{B,c2}$, строго говоря, должно определяться из уравнения равновесия «дозвуковой» и «сверхзвуковой» створок сопла в проекции на ось y при равенстве нулю реакции в упоре. Однако поскольку при достижении равновесия створок сопла ползунки тоже находятся в равновесии, то в этом случае при определении давления $p_{B,c2}$ также можно использовать уравнение (10).

Располагаемые управляющие давления $p_{B,p1}$, $p_{B,p2}$ определяются из уравнения баланса прихода и расхода воздуха в межстворочной полости:

$$G_{отв} - G_{зас} + G_{зас} = 0, \quad (12)$$

где $G_{отв}$ — приход воздуха через рабочие отверстия в «дозвуковой» створке площадью $F_{отв}$; $G_{зас}$ — рас-

ход воздуха через заслонку (площади открытой и закрытой заслонки $F_{зас,о}$, $F_{зас,з}$); $G_{зас}$ — перетечки воздуха через зазоры между створками из области «завесы» в сопле в межстворочную полость или наоборот (площади зазоров в «дозвуковых» и «сверхзвуковых» створках $F_{зас,д}$, $F_{зас,с}$).

В книге Г.Н. Лаврухина (см. библиографический список) приведены результаты экспериментов по определению коэффициентов расхода конических звуковых сопел (при сверхкритическом перепаде давлений). В нашем случае для всех площадей

($F_{отв}, F_{зас.о}, F_{зас.з}, F_{зас.д}, F_{зас.с}$) наиболее близка конфигурация, соответствующая перетечке газа через тонкое отверстие из одного ресивера в другой, т.е. коэффициент расхода $\varphi_c = 0,85$.

Пусть из ресивера с давлением p_1 воздух через отверстие площадью F втекает в ресивер с давлением p_2 . Расход воздуха определится как

$$G = \frac{\varphi_c m p_1 F q(\lambda)}{\sqrt{RT^*}}, \quad (13)$$

где

$$\lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad \text{при } p_2 / p_1 \geq \pi_{кр}; \quad (14)$$

$$\lambda = 1 \quad \text{при } p_2 / p_1 < \pi_{кр};$$

$$\pi_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad (15)$$

$$m = \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}}. \quad (16)$$

При определении расхода $G_{отв}$ необходимо приравнять: $p_1 = p_{гк}$; $p_2 = p_в$. При определении расхода $G_{зас}$ необходимо приравнять: $p_1 = p_в$; $p_2 = p_H$. Здесь $p_{гк}$ — давление на «дозвуковой» створке в точке K (перед отверстием вдува), p_H — давление окружающей среды.

Полагаем, что площади зазоров $F_{зас.д}, F_{зас.с}$ распределены по длинам «дозвуковой» и «сверхзвуковой» створок равномерно, тогда перетечки через зазоры между створками определяются из выражения

$$G_{зас} = \frac{\varphi_c m}{\sqrt{RT^*}} \left[\frac{F_{зас.д}}{l_1} \int_0^{l_1} (-1)^{j_1} p_{1д} q(\lambda_д) dl + \frac{F_{зас.с}}{l_2} \int_0^{l_2} (-1)^{j_2} p_{1с} q(\lambda_с) dl \right]. \quad (17)$$

Для до- и сверхзвуковых створок используется следующий алгоритм:

при $p_г \geq p_в$

$$j_1 = j_2 = 0; p_{1д} = p_г; p_{1с} = p_г; p_2 = p_в;$$

при $p_г < p_в$

$$j_1 = j_2 = 1; p_{1д} = p_в; p_{1с} = p_в; p_2 = p_г.$$

Приведенные скорости $\lambda_д$ и $\lambda_с$ определяются из выражений (14) и (15).

Необходимо отметить, что при подстановке всех расходов в уравнение баланса (12) комплекс $\frac{\varphi_c m}{\sqrt{RT^*}}$

сокращается.

Убедившись в выполнении условия работоспособности РДС (1), определим осевые усилия, возникающие в упорах D_1 и D_2 при закрытом и открытом сопле, из уравнения равновесия ползунка

$$D_x = -(C_x n + p_в F_в + P_{ос.г}). \quad (18)$$

Здесь в уравнения (6), (7), (18) подставляются значения располагаемых управляющих давлений $p_{в.р1}, p_{в.р2}$.

Распределение давления p_r по длине сопла, а также импульсы J_E, J_C в сечениях сопла E и C определялись с помощью программы ANSYS/FLOTTRAN.

Проведем расчет работоспособности РДС в закрытом положении. При расчете течения в сопле использовался воздух с параметрами торможения на входе $p^* = 0,6$ МПа, $T^* = 293$ К. На рис. 2 приведено поле числа Маха, полученное в ходе расчета. Видно, что параметры течения в сопле имеют сильную радиальную неравномерность.

На рис. 3 и 4 приведено распределение давления вдоль образующих «дозвуковой» и «сверхзвуковой» створок. Отметим, что здесь и в дальнейшем на графиках приводится избыточное давление ($p_H = 101325$ Па). Отметим также, что если для «дозвуковой» створки длина образующей исчисляется по течению потока, то для «сверхзвуковой» створки — против течения потока (от точки C к точке N).

На рис. 5 показано, как меняется давление по радиусу на выходе из «сверхзвуковой» створки (сечение C). Видно, что давление на стенке сопла существенно ниже давления в ядре потока.

Расчеты, проведенные по формулам (3)—(11), дали значение давления страгивания для закрытого сопла $p_{в.с1} = 0,264$ МПа, при этом осевое усилие, действующее на ползунки со стороны продуктов сгорания, равнялось $P_{ос.г} = -1328,5$ Н.

При определении располагаемого давления в межстворочной полости использовались следующие значения характерных площадей: $F_{отв} = 3,9$ см²; $F_{зас.з} = 0,41$ см²; $F_{зас.о} = 23$ см²; $F_{зас.д} = 4 \div 7$ см²; $F_{зас.с} = 8 \div 18$ см². Располагаемое давление для закрытого сопла в соответствии с изменением площадей зазоров, в указанных диапазонах, изменялось в пределах $p_{в.р1} = 0,268 \div 0,379$ МПа. Видно, что рассматриваемая конструкция РДС при закрытом положении сопла удовлетворяет условию работоспособности (1).

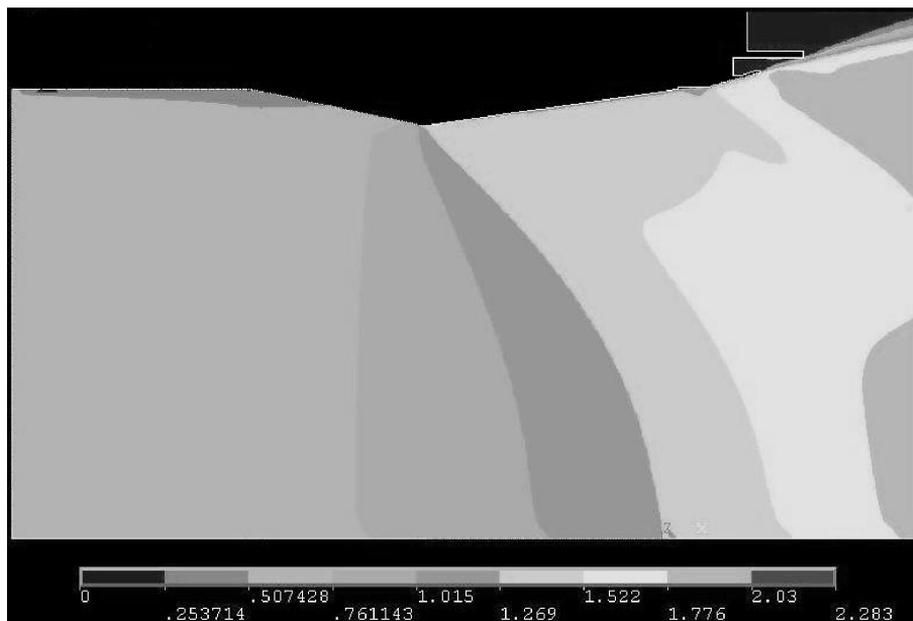


Рис. 2. Поле числа Маха в закрытом сопле

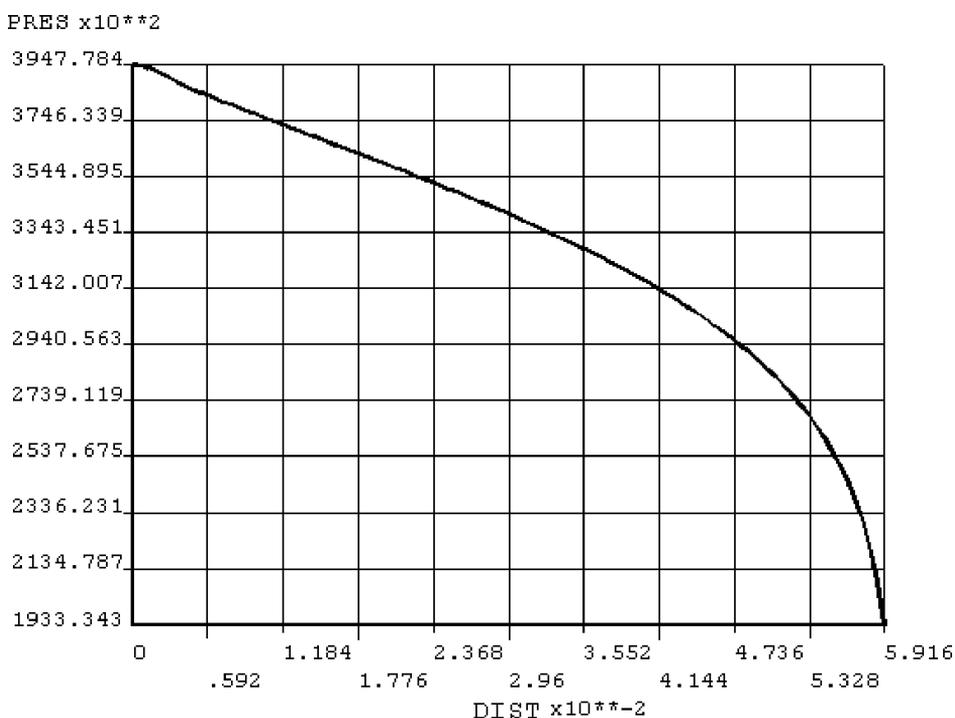


Рис. 3. Изменение давления по образующей «дозвуковой» створки закрытого сопла

На рис. 6 и 7 приведено распределение давления вдоль образующих «дозвуковой» и «сверхзвуковой» створок для открытого сопла.

Для открытого сопла давление страгивания равняется $p_{в.с2} = 0,295$ МПа, при $P_{ос.г} = -1500$ Н, а располагаемое давление меняется в диапазоне $p_{в.п2} = 0,215 \div 0,255$ МПа. Таким образом, условие работоспособности (1) выполняется и в этом случае.

Проведенный демонстрационный расчет подтвердил работоспособность действующей конструкции РДС, что говорит об адекватности разработан-

ной математической модели моделируемому процессу.

Выводы

Разработана математическая модель для расчета работоспособности регулируемого двухпозиционного сопла ПВРД на жидком топливе, адекватность которой косвенно подтверждена в ходе демонстрационного расчета работоспособности действующей конструкции РДС.

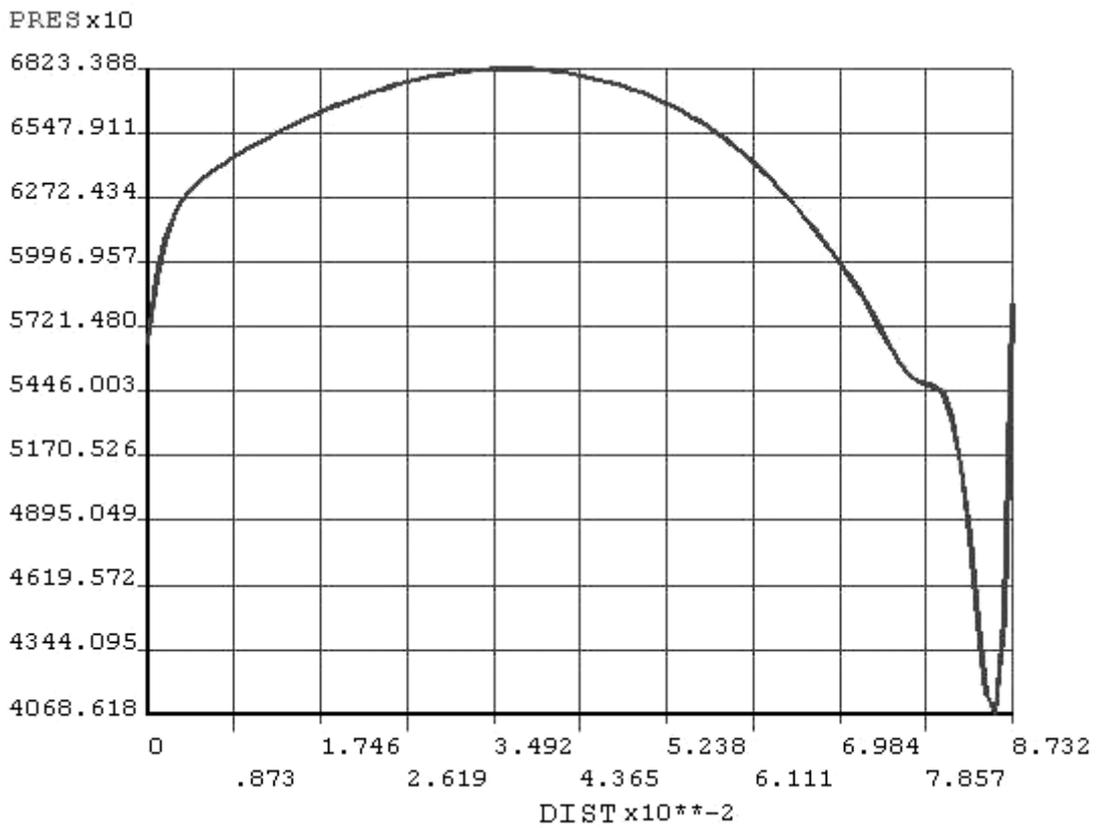


Рис. 4. Изменение давления по образующей «сверхзвуковой» створки закрытого сопла

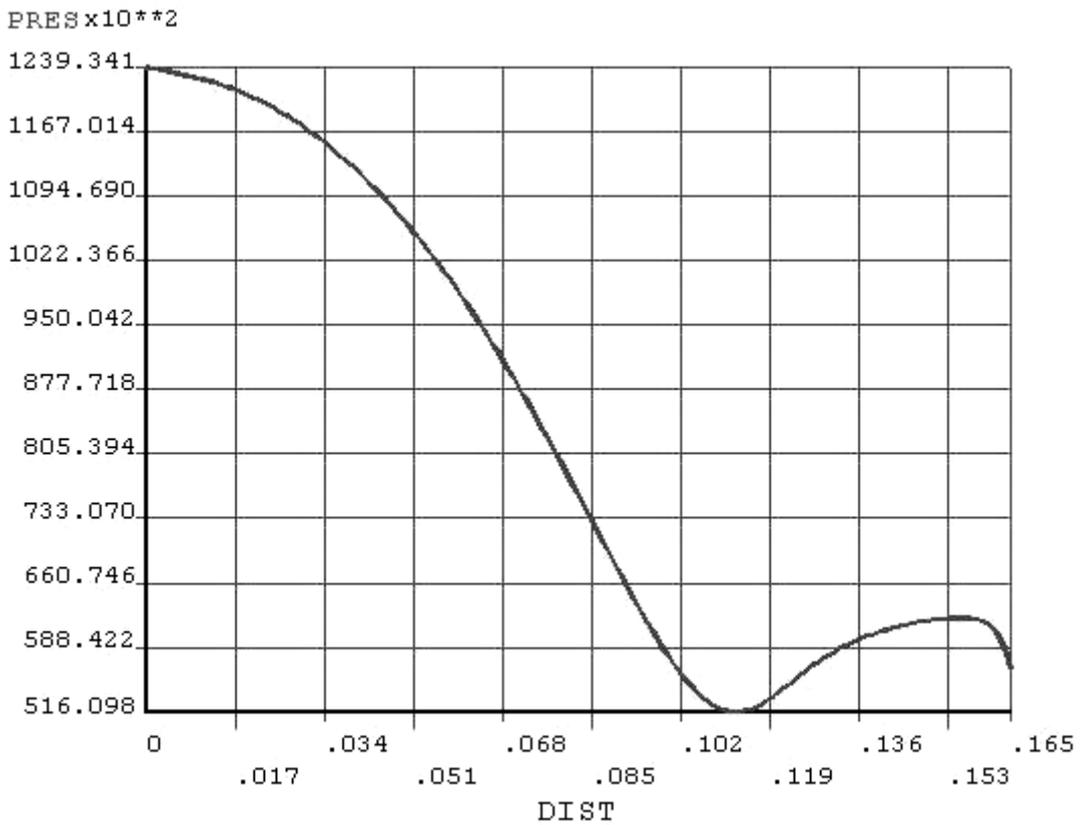


Рис. 5. Изменение давления по радиусу на выходе из «сверхзвуковой» створки

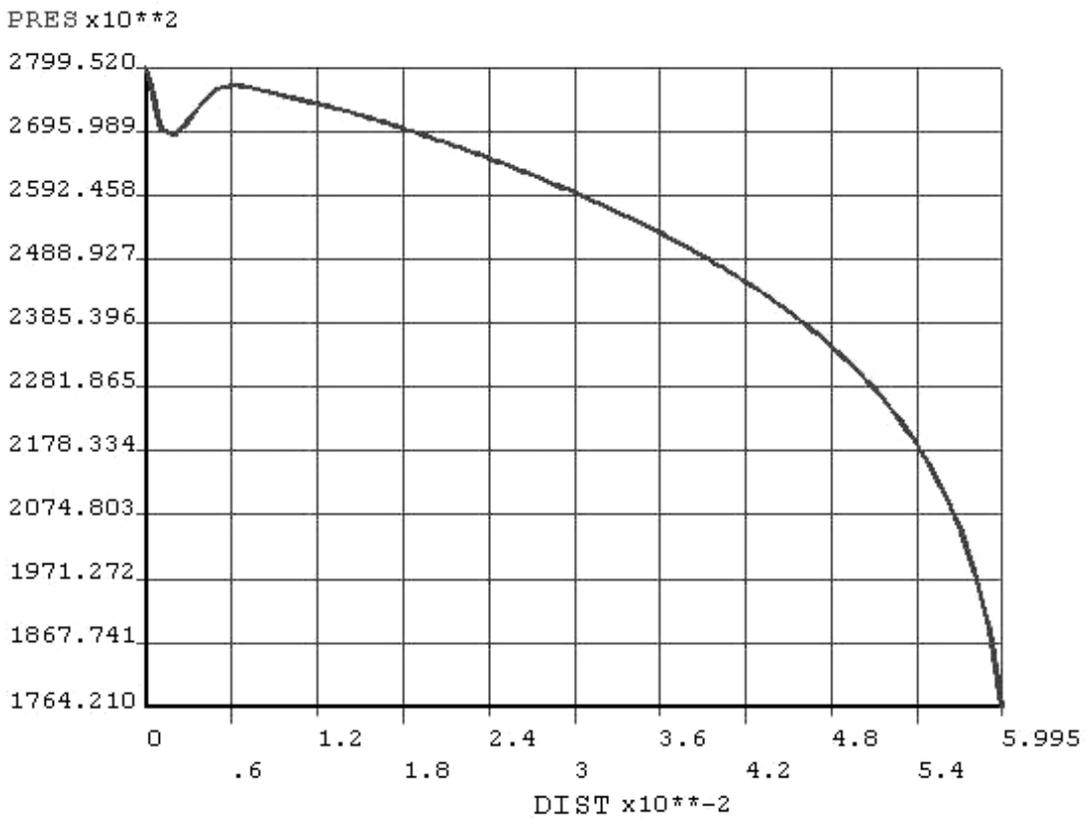


Рис. 6. Изменение давления по образующей «дозвуковой» створки открытого сопла

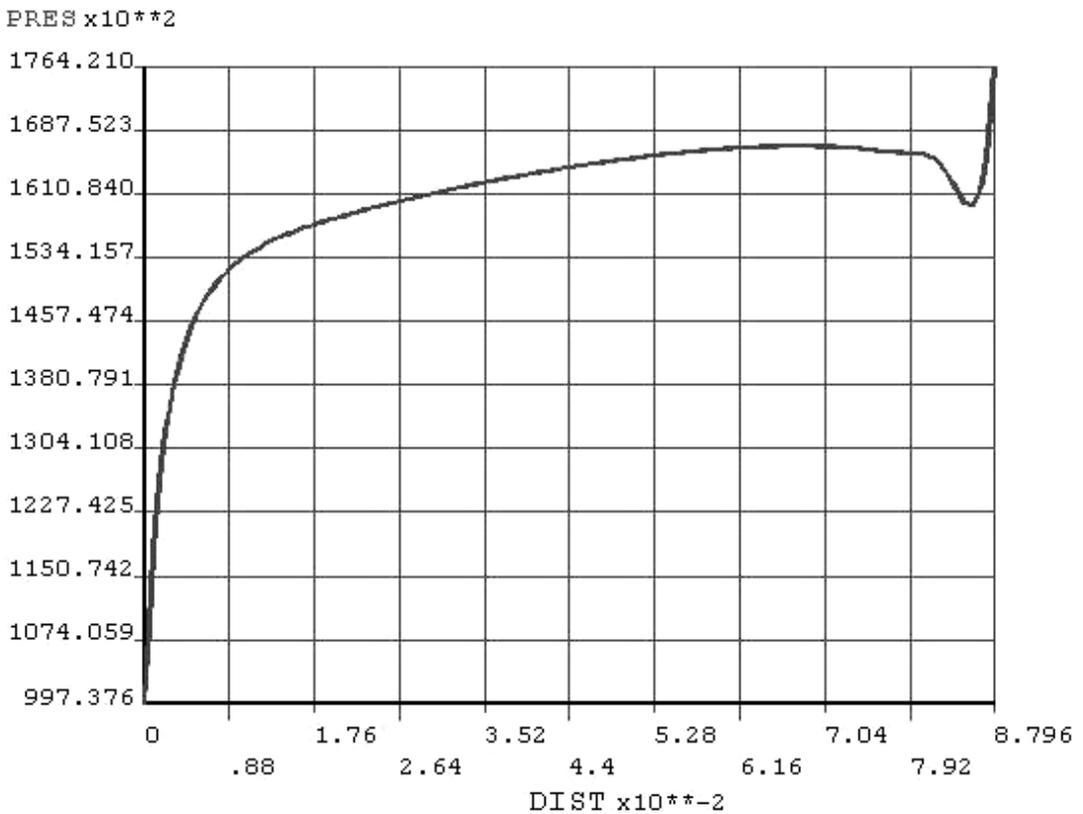


Рис. 7. Изменение давления по образующей «сверхзвуковой» створки открытого сопла

Библиографический список

Лаврухин Г.Н. Аэрогазодинамика реактивных сопел. Т. 1. — М.: Физматлит, 2003.

ОАО ТМКБ «Союз»
Статья поступила в редакцию 20.09.2008