DOI: 10.34220/2311-8873-2022-32-40

УДК 621.793.71

2.5.6 – технология машиностроения

ЗАЩИТА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОТ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВЫМИ ПОТОКАМИ

Кадырметов Анвар Минирович
доктор технических наук, зав. кафедрой машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

✉[1]**Попов Дмитрий Анатольевич**
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ
e-mail: qaz.7@mail.ru

Болгов Андрей Вячеславович
студент 3 курса машиностроительного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

Буренко Никита Сергеевич
студент 3 курса машиностроительного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

Аннотация.
Приводится аналитическое обоснование защиты рабочей поверхности дробеструйного сопла от абразивного износа применением сверхзвуковых пристеночных потоком в сравнении с дозвуковыми пристеночными потоками. Расчеты подтверждены экспериментальными исследованиями на усовершенствованном дробеструйном сопле.

Ключевые слова: ДРОБЕСТРУЙНОЕ СОПЛО, АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС, СВЕРХЗВУКОВЫЕ ПРИСТЕНОЧНЫЕ ПОТОКИ.

PROTECTION OF WORKING SURFACES OF TECHNOLOGICAL TOOLS FROM JET-ABBROUS EXPOSURE SUPERSONIC STREAMS

Kadyrmetov Anvar Minirovich
doctor of technical sciences, professor head. department of engineering technologies Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

✉[1]**Popov Dmitrii Anatolevich**
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of mechanical engineering technologies, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF
e-mail: qaz.7@mail.ru

Bolgov Andrei Vyacheslavovich
3rd year student of the faculty of mechanical engineering, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Burenko Nikita Sergeevich
3rd year student of the faculty of mechanical engineering, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Annotation.
An analytical substantiation of the protection of the working surface of the shot blasting nozzle from abrasive wear using supersonic near-wall flows in comparison with subsonic near-wall flows is given. The calculations are confirmed by experimental studies on an improved shot blasting nozzle.

Keywords: SHOT BLASTING NOZZLE, ABRASIVE WEAR, SUPERSONIC WALL FLOWS.

[1]*Автор для ведения переписки*

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Традиционные меры повышения износостойкости рабочих поверхностей технологических средств, таких как, например, дробеструйные устройства, от струйно-абразивного воздействия за счет использования твердосплавных материалов малоэффективны [1-3]. Недостаточной защитной способностью поверхностей обладают также дозвуковые пристеночные газовые потоки. В связи с этим представляет интерес использование для этой цели недорасширенных сверхзвуковых пристеночных потоков. Отжатие ими основного струйно-абразивного потока происходит вследствие того, что на длине пристеночного потока до сечения «запирания» граница сверхзвуковой струи обладает высокой устойчивостью к воздействию на ее извне возмущений, в том числе и в виде отдельных частиц, например, абразива [4]. Это объясняется упругими свойствами границы струи, так как при сверхзвуковой скорости уменьшение проходного сечения потока приводит к его торможению и увеличению давления [5-7].

Дополнительно к этому защитные свойства сверхзвуковой струи проявляются в следующем: когда упругости сверхзвуковой струи недостаточно и частица все-таки пробивает ее границу, то в момент проникновения частицы в струю на величину, примерно равную радиусу частицы, сверхзвуковой поток перед частицей локально затормозится, что вызовет повышение давления. Вследствие существенной разницы давления, действующих на частицу в этом случае со стороны пристеночного сверхзвукового и основного потоков, частица вытолкнется пристеночным потоком, не успев коснуться стенки рабочего сопла. К этому выводу можно прийти путем аналитически обоснованного следующего обоснования.

2 Результаты исследований

Перед частицей в сверхзвуковом потоке образуется скачок уплотнения, давление за которым описывается уравнением [8] :

$$P_2 = \frac{P_1}{k+1} \cdot [2 \cdot k \cdot M_1^2 - (k-1)], \tag{1}$$

где k – показатель адиабаты рабочего тела в сверхзвуковом потоке; M_1 – число Маха перед скачком уплотнения; P_1 – давление перед скачком уплотнения; P_2 – давление после скачка уплотнения.

Давление P_2, определимое формулой (1), можно считать средним давлением, воздействующим непосредственно на частицу, так как оно находится между минимальным и максимальным давлением, действующим на переднюю точку частицы. Давление перед скачком уплотнения выражается через давление энергоносителя в ресивере (давление торможения), откуда он поступает, следующей формулой (1):

$$P_1 = P_a^* \cdot (1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_1^2)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{2}$$

где P_a^* – давление торможения в сверхзвуковом потоке; $\lambda = \frac{\omega_1}{a_{кр}}$ – коэффициент скорости; ω_1 – скорость потока перед скачком уплотнения, м/с; $a_{кр}$ – критическая скорость, м/с.

Число Маха через коэффициент скорости выражается формулой [4]:

$$M_1^2 = \frac{\frac{2}{k+1} \cdot \lambda_1^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_1^2} \quad . \tag{3}$$

Подставляя (2) и (3) в (1), имеем:

$$P_2 = \frac{P_a^*}{k+1} \cdot (1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_1^2)^{k/k-1} \cdot [2k \frac{\frac{2}{k+1} \cdot \lambda_1^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_1^2} - (k-1)]. \quad (4)$$

Выталкивающая сила, действующая на частицу, определится выражением

$$F = \pi \cdot r_{част}^2 \cdot \Delta P, \quad (5)$$

где $r_{част}$ – радиус частицы.

$$\Delta P = P_2 - P_{осн}$$

$P_{осн}$ – статическое давление в основном потоке.

Давление дополнительного энергоносителя дробеструйного сопла, который эжектирует абразив с энергоносителем (в результате чего образуется основной поток), берем равным 0,5 МПа, поэтому $P_{осн}$ лежит в пределах 0,1-0,5 МПа.

С другой стороны,

$$F = a \cdot m, \quad (6)$$

где a – ускорение частицы; m – масса частицы.

Из (5) и (6) следует:

$$a = \frac{\pi \cdot r_{част}^2 \cdot \Delta P}{m} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\Delta P}{r_{часть} \cdot \rho}, \quad (7)$$

где ρ – плотность материала частицы.

По определению: $a = \frac{d v_н}{dt}$.

Проинтегрируем это уравнение

$$\int_{v_{н_0}}^{0} d v_н = a \cdot \int_0^t dt,$$

где a – средняя величина ускорения равнозамедленного движения.

Откуда следует

$$t = -\frac{v_{No}}{a}, \quad (8)$$

где v_{No} – нормальная к внутренней поверхности дробеструйного сопла составляющая скорости частицы.

Согласно [9] скорость частиц на входе из обычного дозвукового дробеструйного сопла при давлении сжатого воздуха 0,5 МПа не превышает 60 м/с и при угле раствора $2 \cdot \gamma = 16^0$ оставляет не более $v_{No} = 60 \cdot \sin\gamma = 8,35$ $м/с$.

Хотя скорость частиц внутри сопла меньше, чем на выходе, для надежности выводов возьмем неблагоприятный вариант $v_{No} = 10$ м/с. Нормальная составляющая к поверхности часть пути, которую пройдет частица за время t при изменении ее скорости v_{No} от 10 м/с до нуля в предложении равнозамедленного движения, составит:

$$S = v_{No} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot |a| \cdot t^2 \ . \qquad (9)$$

Подставим в (9) выражения (7) и (8):

$$S = v_{No} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{r_{част} \cdot \rho_{част} \cdot v_{No}^2}{\Delta P} \ . \qquad (10)$$

Рассчитаем путь S для следующих параметров: k = 1,4; $\rho_{част}$ =7800 кг/м^3; $r_{част1} = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ м; $r_{част2} = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $v_{No} = 10$ м/с; $P_{осн} = 0{,}2$ МПа. Давления торможения в сверхзвуковом потоке для перепадов давления $\Delta P_1 = 0{,}5$ МПа, $\Delta P_2 = 1$ МПа и $\Delta P_3 = 2$ МПа при этом для будут составлять соответственно:

при $\lambda_1 = 1{,}2$ – $P_{a_1}^* = 2{,}71$ МПа; $P_{a_2}^* = 4{,}65$ МПа; $P_{a_3}^* = 8{,}53$ МПа;

при $\lambda_2 = 2{,}2$ – $P_{a_1}^* = 2{,}24$ МПа; $P_{a_2}^* = 3{,}83$ МПа; $P_{a_3}^* = 7{,}03$ МПа.

Результат расчетов S в мм сведем в таблицу 1.

Таблица 1 – Зависимость дополнительного (к $S = r_{част}$) проникновения частиц в сверхзвуковую пристеночную струю от разницы между давлением после скачка уплотнения и основным потоком ΔP, мм

ΔP, МПа	$r_{част} = 0{,}4$ мм	$r_{част} = 1$ мм
0,5	0,416	1,040
1	0,208	0,502
2	0,104	0,251

Из таблицы 1 видно, что при изменении перепада давления от 0,5 до 2 МПа, что соответствует подаваемому давлению торможения защитного энергоносителя $P_a^* = 2{,}2 \ldots 8{,}5$ МПа, нормальная к поверхности рабочего сопла составляющая перемещения частицы после ее проникновения в сверхзвуковую пристеночную струю на величину радиуса, как было отмечено выше, падает в 4 раза от значения, равного радиусу частицы. Следовательно, суммарное проникновение частицы в сверхзвуковую струю в этом случае не будет превышать диаметра частицы.

При этом, с одной стороны, как было отмечено выше, не учитывалось гашение нормальной составляющей скорости частицы из-за упругости сверхзвуковой струи за счет уменьшения ее проходного сечения, что дополнительно вызовет уменьшение нормального к поверхности контакта перемещения частицы.

С другой стороны, однако не учитывалась конечная толщина пограничного слоя между основным и сверхзвуковым потоками, которая на участке первой «бочки» сверхзвукового потока до сечения его «запирания» мала и соразмерна диаметру частицы [4], и поэтому, вследствие большого градиента скорости по толщине пограничного слоя, а следовательно, по диаметру частицы, последняя проникает в сверхзвуковую пристеночную струю на расстояние, несколько большее вышеуказанного.

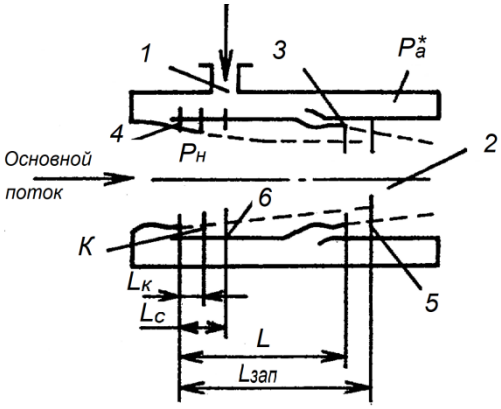
В результате максимальное перемещение частицы в нормальном к поверхности контакта направлении при вышеуказанных условиях будет примерно равным диаметру частиц. Следует отметить, что при отталкивании частицы будут дополнительно ускоряться в направлении движения основного потока.

Таким образом, при определенных условиях частицы будут отталкиваться пристеночной сверхзвуковой струей, не успев коснуться внутренних стенок дробеструйного сопла и ускоряться в направлении движения основного потока.

Одним из таких условий для отдельно взятой сверхзвуковой пристеночной струи является то, что защитный эффект достигается на участке струи до сечения «запирания», так

как после него начинается активное смещение пристеночного и основного потоков [4].

В связи с этим для защиты больших поверхностей от струйно-абразивного воздействия необходимо создавать множественные пристеночные сверхзвуковые потоки таким образом, чтобы гарантированно покрыть ими защищаемую поверхность. Для этого их последовательно располагают вдоль защищаемой поверхности с взаимными перекрытиями друг друга. При этом каждое начало последующей сверхзвуковой пристеночной струи располагают от начала предыдущей струи на расстоянии L, не превышающее длину струи до сечения «запирания» ($L_{зап}$), то есть на длину $L \le L_{зап}$ (рис. 1).



1 – канал подвода защитного энергоносителя; *2* – рабочее сопло; *3, 4* – выходные сечения пристеночных сопел; *5* – сечение запирания; *6* – изобарическое сечение

Рисунок 1 – Схема защитных сверхзвуковых пристеночных потоков

С другой стороны, расстояние L должно быть больше определенной минимальной величины, соответствующей длине до изобарического сечения сверхзвуковой струи L_c (сечения, в котором статическое давление в пристеночной струе равно давлению в основном потоке). Это объясняется тем, что на длине струи в интервале $0 < L < L_c$, имеется сечение «*К*», в котором отношение давлений P_a^* / P_k является критическим, равным единице (соответствующим достижению скорости струи скорости звука в ней). Следовательно, на длине $L = 0 \ldots L_c$ отношение давлений P_a^* / P_k меняется от дозвукового до сверхзвукового отношения $П_O = P_a^* / P_н$ проходя критическое значение, равное единице. При этом, если расположить выходные сечения последующих сопел относительно предыдущих на длине L от нуля до L_k, то отношение P_a^* / P_k будет докритическим, а течение дозвуковым или даже «запертым» (прекращенным), как это может иметь место, например, в эжекторах [4]. Дозвуковое же течение каждой последующей пристеночной струи тормозит предыдущую сверхзвуковую струю и приводит к активному их перемешиванию, что гасит скорость сверхзвуковой струи, уменьшает ее устойчивость, способствует размыванию ее границ и ослабляет защитные свойства.

Таким образом, расстояние между сверхзвуковыми пристеночными недорасширенным потокам необходимо выбирать из условия (рис. 1):

$$L_c \le L \le L_{зап}.$$

В качестве примера рассмотрим расчетное определение длин L_C и $L_{зап}$. Для этого воспользуемся способом, позволяющим приближённо, но достаточно точно определять контур расширяющейся начальной части сверхзвуковой струи на основании результатов, получаемых из одномерного расчета [4].

Рассмотрим уравнение неразрывности и количества движения для любых сечений начального участка недорасширенной сверхзвуковой струи [4].

$$\begin{cases} q(\lambda, \alpha) = \frac{1}{\sigma \cdot f} \cdot q(\lambda_a) \\ Z(\lambda, \alpha) = Z(\lambda_a) + \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \frac{f-1}{\Pi_0 \cdot q(\lambda_a)} \end{cases}, \quad (11)$$

где $f = \frac{F}{F_a}$ – относительная площадь выбранного сечения струи; F_a – площадь выходного сечения сверхзвукового сопла; $\lambda = \frac{\omega}{a_{кр}}$ – коэффициент абсолютной скорости; λ_a – коэффициент абсолютной скорости в выходном сечения сверхзвукового сопла; ω – абсолютная скорость сверхзвуковой струи; $a_{кр}$ – критическая скорость (местная скорость звука в критическом сечении сопла); $\sigma = \frac{P^*}{P_a^*}$ – коэффициент полного давления (примем $\sigma = 1$ согласно [4]); k – показатель адиабаты; α – угол между вектором абсолютной среднемассовой скоростью газа и осью сопла; $\Pi_0 = \frac{P_a^*}{P_H}$ – располагаемое отношение давления.

$$Z(\lambda, \alpha) = \frac{1}{\cos\alpha} \cdot [(\frac{2k}{k+1} \cdot \cos^2\alpha - \frac{k-1}{k+1}) \cdot \lambda + \frac{1}{\lambda}]; \quad (12)$$

$$q(\lambda, \alpha) = q(\lambda) \cdot \cos\alpha; \quad (13)$$

$$Z(\lambda) = \lambda + \frac{1}{\lambda}; \quad (14)$$

$$q(\lambda) = (\frac{k+1}{2})^{1/(k-1)} \cdot \lambda \cdot (1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2)^{1/(k-1)}. \quad (15)$$

Далее будут использованы величины: $n = \frac{P_a}{P_H}$ – степень нерасчётности струи; P_a – статистическое давление в выходном сечении сверхзвуковых сопел; P_a^* – полное давление в выходном сечении сверхзвуковых сопел; β – угол между касательной к образующей сопел в выходном сечении и осью; r_m – внутренний радиус кольцевого контура сверхзвуковой пристеночной струи; M – число Маха; $\overline{F_c} = \frac{F_a}{F_{тр}}$ - отношение выходной площади сверхзвукового сопла к площади внутреннего сечения дробеструйного сопла.

Следует отметить, что в действительном неравномерном потоке углы отклонения векторов скорости от оси отличаются в различных точках сечения и увеличиваются от оси к периферии, поэтому углы α в системе уравнений (11) будут некоторым средними углами. Однако, учитывая, что основная часть расхода газа проходит через периферийную зону сечений как из-за большей площади ее, так и из-за малой плотности тока в центральной перерасширенной части струи [4], то можно полагать, что эта средняя величина угла будет близка к величинам углов расширения у границы струи.

Определив из системы уравнений (11) относительную площадь f_m и коэффициент абсолютной скорости λ_m для сечения запирания (в сечении запирания $\alpha_m = 0$), можно численным методом, меняя λ_i от λ_a до λ_m с выбранным шагом $\Delta\lambda$, определить значения α_i и f_i, а затем длины элементарных участков $\overline{\ell_i} = \ell_i / R_{тр} = (r_{i+1} - r_i) \cdot ctg\,\alpha_i / R_{тр}$ и относительную длину струи до сечения запирания:

$$\overline{L_{зап}} = \frac{L_{зап}}{R_{тр}} = \frac{\sum_{i}^{зап} \ell_i}{R_{тр}} = \sum_{i}^{зап} \overline{\ell_i},$$

где $R_{тр}$ – радиус внутренней поверхности дробеструйного сопла

Из системы уравнений:

$$y(\lambda_c) = \Pi_o \cdot \frac{1}{f_c} \cdot q(\lambda_a) \tag{16}$$

$$\lambda_c + \frac{1}{\lambda_c} = Z(\lambda_a) + (\frac{k+1}{2})^{1/(k-1)} \cdot \frac{f_c - 1}{\Pi_o \cdot q(\lambda_a)},$$

где $y(\lambda) = (\frac{k+1}{2})^{1/(k-1)} \cdot \frac{\lambda}{1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2}$,

определив λ_c и f_c для изобарического сечения, можно аналогично рассчитать:

$$\overline{L_c} = \frac{L_c}{R_{тр}} = \sum_{i}^{изобар} \overline{\ell_i}. \tag{17}$$

Для системы уравнения (11) и (16) был составлен алгоритм, программа расчета. Программа расчета была отлажена в соответствия с данными, имеющимся в [4] для круглой струи по 6 сечениям для случая:

1 – $M_a = 2{,}5$; $n = 6{,}43$; $\beta = 5^o$; $k = 1{,}4$;

2 – $M_a = 1{,}0$; $n = 24{,}6$; $\beta = 0^o$; $k = 1{,}4$.

Расчет проводился в следующих точках области изменения параметров:

$\lambda_a = 1$; $\beta = 0$;

$\Pi_o =$ 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 50, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600;

$\overline{F_c} =$ 0,02; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7;

$k =$ 1,33; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7.

Из этих точек были исключены те, в которых возникает режим запирания основного потока сверхзвуковым. Оказалось, что уже при $\Pi_o \geq 15$ для того, чтобы сопло не запиралось, необходимо, чтобы $F_c < 0{,}2$. Для удобства анализа влияния величин Π_o, $\overline{F_c}$ и k на $L_{зап}$ и L_c при $\lambda_a = 1$ и $\beta = 0$ была проведена квадратичная аппроксимация по методу наименьших квадратов для $\Pi_o < 20$, в результате которой были получены функции:

$$\overline{L_{зап}} = 0{,}827 + 1{,}115 \cdot \overline{F_c} + 0{,}012 \cdot \Pi_0 - 1{,}125 \cdot k + 2{,}659 \cdot \overline{F_c^2} + 5{,}6 \cdot 10^{-4} \cdot \Pi_0^2 + 0{,}436 \cdot k^2 + 0{,}9148 \cdot \overline{F_c} \cdot \Pi_0 - 2{,}084 \cdot k \cdot \overline{F_c} - 0{,}029 \cdot \Pi_0 \cdot k; \tag{18}$$

$$\overline{L_c} = -0{,}105 + 0{,}166 \cdot \overline{F_c} - 0{,}0026 \cdot \Pi_0 + 0{,}156 \cdot k + 0{,}761 \cdot \overline{F_c^2} + 1{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot \Pi_0^2 - 0{,}044 \cdot k^2 + 0{,}291 \cdot \overline{F_c} \cdot \Pi_0 - 0{,}38 \cdot k \cdot \overline{F_c} - 0{,}003 \cdot \Pi_0 \cdot k. \tag{19}$$

Учитывая погрешность аппроксимации, которая в данном случае не превышает 15 … 20 % для достижения положительного эффекта необходимо выбирать $\overline{L}$ из условия:

$$\overline{L} = 1{,}2 \cdot \overline{L_c} \ldots 0{,}8 \cdot \overline{L_{зап}} = (1 - m) \cdot 1{,}2 \cdot \overline{L_c} + m \cdot 0{,}8 \cdot \overline{L_{зап}}, \tag{20}$$

где $m = 0 \ldots 1$.

Анализ зависимостей (18) и (19) показывает, что $1{,}2 \cdot \overline{L_c} < 0{,}8 \cdot \overline{L_{зап}}$, следовательно, выражение (20) имеет смысл.

Подставляя $\overline{L_{зап}}$ из (18) и $\overline{L_c}$ из (19) в выражение (20), имеем для сверхзвукового кольцевого пристеночного потока

$$\overline{L} = a_0 + a_1 \cdot \overline{F_c} + a_2 \cdot \Pi_0 + a_3 \cdot k + a_4 \cdot \overline{F_c^2} + a_5 \cdot \Pi_0^2 + a_6 \cdot k^2 + a_7 \cdot \overline{F_c} \cdot \Pi_0 + a_8 \cdot \overline{F_c} \cdot k + a_9 \cdot \Pi_0 \cdot k, \quad (21)$$

где $a_0 = -0{,}126...0{,}662$; $a_1 = 0{,}199...0{,}892$; $a_2 = -0{,}0031...0{,}0096$; $a_3 = -0{,}9...0{,}187$;
$a_4 = 0{,}913...2{,}127$; $a_5 = (1{,}32...4{,}5) \cdot 10^{-4}$; $a_6 = -0.053...0{,}349$; $a_7 = 0{,}349...0{,}732$;
$a_8 = -1{,}667... - 0{,}456$; $a_9 = -0{,}0036... - 0{,}023$.

Аналогичная зависимость была получена для относительного радиуса в сечении запирания сверхзвуковой струи $\overline{r_m} = \dfrac{r_m}{R_{тр}}$:

$$\overline{r_m} = 0{,}694 - 0{,}681 \cdot \overline{F_c} - 0{,}018 \cdot \Pi_0 + 0{,}459 \cdot k - 0{,}506 \cdot \overline{F_c^2} - 1{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot \Pi_0 - 0{,}175 \cdot k^2 - 0{,}213 \cdot \overline{F_c} \cdot \Pi_0 + 0{,}564 \cdot k \cdot \overline{F_c} + 0{,}015 \cdot \Pi_0 \cdot k. \quad (22)$$

3 Обсуждение и заключение

1 По сравнению с дозвуковыми пристеночными потоками защита поверхностей сверхзвуковым потока, во-первых, более эффективна и позволяет полностью защитить их от струйно-абразивного воздействия, и, во-вторых, достигается подбором давления защитного энергоносителя и другими характеристиками (F_c, λ_a, β, k), обеспечивающими расстояния между сверхзвуковыми соплами, равными $L = L_c ... L_{зап}$.

2 Расстояние L в зависимости от геометрии сверхзвукового сопла и характеристик энергоносителя может быть определено расчетом, например, по формуле (21).

3 Сверхзвуковые пристеночные потоки повышают энергетику основного потока – повышают его скорость и скорость частиц.

4 Результаты расчета позволили прямо наметить пути решения задачи защиты поверхностей дробеструйных сопел от струйно-абразивного воздействия и были экспериментально проверены [10].

Список литературы

1 Суслов, А. Г. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов и др. М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.

2 Минеев, А. С. Статистический анализ износа направляющих металлорежущих станков // Физика, химия и механика трибосистем : межвуз. сб. науч. тр., Вып. 4./ Иван. гос. ун-т. Иваново, 2005. – С. 60-62.

3 Утенков, В. М. Прогнозирование потери точности металлорежущих станков с направляющими скольжения: Автореф. дис…. д-ра техн. наук : 05.03.01 / В. М. Утенков. – М., 1995. – 29 с.

4 Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика. М. : Наука, 1969. – 824 с.

5 Воронецкий, А. В. Особенности течения сверхзвуковых потоков в узких цилиндрических каналах/ А. В. Воронецкий, С. А. Сучков, Л. А. Филимоно Инженерный журнал : наука и инновации, 2013, вып. 4. – С. 1-17.

6 Гуськов, О. В., Копченов В. И., Липатов И. И., Острась В. Н., Старухин В. П. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах / О. В. Гуськов, В. И. Копченов, И. И. Липатов, В. Н. Острас, В. П. Старухин. – Москва, Физматлит. – 2008. – 168 с.

7 Липатов, И. И. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах. Известия Саратовского университета. Сер. Математика. Механика. Информатика, 2008, т. 8. вып. 3, с. 49-56.

8 Ландау, Л. Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика : Учебное пособие. В 10 т., т.У1 Гидродинамика. 4-е изд., стер. М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1988. – 736 с.

9 Рыковский Б. П., Смирнов В. А., Щетинин Г. М. Местное упрочнение деталей поверхностными наклепом. М. : Машиностроение, 1985. – 152 с.

10 А. с. № 1662819 В24С 1 / 00. Способ защиты поверхностей в струйно-абразивных эжекционных аппаратах / Б. Е. Гутман, А. М. Кадырметов и др. – Бюл. № 26 15.07.91. – С. 5.

References

1 Suslov, A. G. Engineering of the surface of parts / A. G. Suslov, V. F. Bezylazny, Yu. V. Panfilov et al. M. : Mechanical engineering, 2008. – 320 p.

2 Mineev A. S. Statistical analysis of wear of guide metal-cutting machines // Physics, chemistry and mechanics of tribosystems: mezhvuz. sb. nauch. tr., Issue 4./ Ivan. gos. un-T. Ivanovo, 2005.– pp. 60-62.

3 Utenkov V. M. Forecasting the loss of accuracy of metal-cutting machines with sliding guides : Abstract. dis.... Doctor of Technical Sciences : 05.03.01 / V. M. Utenkov. – M., 1995. – 29 p.

4 Abramovich G. N. Applied gas dynamics. M. : Nauka, 1969. 824 p.

5 Voronetskiy, A. V. Features of the current in excess of the sound flows in narrow cylindrical channels / A. V. Voronetsky, S. A. Suchkov, L. A. Filimono Engineering Journal : Science and Innovation, 2013, issue. 4. – C. 1-17.

6 Guskov, O. V., Kopchenov V. I., Lipatov I. I., Ostrace V. N., Starukhin V. P. The processes of inhibition of supersonic currents in the channels / O. V. Guskov, V. I. Kopchenov, I. I. Lipatov, V. N. Ostrass, V. P. Starukhin. – Moscow, Physo Matite. – 2008. – 168 p.

7 Lipatov, I. I. The processes of inhibition of supersonic currents in the channels. Izvestia of the University of Saratov. Ser. Maths. Mechanics. Informatics, 2008, vol. 8. Issue. 3, p. 49–56.

8 Landau L. D., Lifshits E. M. Theoretical physics: Textbook. In 10 t., T.U1 hydrodynamics. 4th ed., Erased. M. : Science. Ch. Ed. physical mat. Lit., 1988. – 736 p.

9 Rykovsky B. P., Smirnov V. A., Shchetinin G. M. Local hardening of parts with superficial sticks. M. : Mechanical Engineering, 1985. – 152 p.

10 A. c. № 1662819 B24C 1 / 00. A method for protecting surfaces in jet -abbrous ejection devices / B. E. Gutman, A. M. Kadirmetov and others – Bul. No. 26 07.15.91. – S.5.

© Кадырметов А.М., Попов Д.А., Болгов А.В., Буренко Н. С., 2022