

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СМЕСИ В ВЫХОДНОМ СЕЧЕНИИ СТРУЙНОГО АППАРАТА

Мещеряков А.В., Шулепов А.П., Ерхов И.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Производительность и качество струйной гидроабразивной обработки (ГАО) зависят от энергетических возможностей гидроабразивной струи, формируемой струйным аппаратом. Основными требованиями, предъявляемыми к струйным аппаратам, являются: обеспечение максимальной скорости струи при минимальном расходе энергоносителя и равномерного распределения абразивных частиц по сечению струи. Первое требование определяет производительность, а второе влияет на качество обработки. Для определения скорости гидроабразивной струи, движущейся в воздухе, необходимо решить задачу по определению параметров состояния воздуха, жидкости и абразивного материала в выходном сечении смесительного сопла струйного аппарата.

В настоящее время при струйной ГАО наибольшее применение находят аппараты с принудительной насосной подачей суспензии в камеру смешения и последующим ее разгоном сжатым воздухом. Такие аппараты являются многорежимными и позволяют в достаточно широких пределах изменять скорость истечения гидроабразивной струи из смесительного сопла только за счет изменения давления воздуха перед активным соплом. Как правило, активные сопла выполняют сужающимися, работающими при сверхкритическом отношении давлений, поэтому процесс дальнейшего расширения воздуха происходит в проточной части смесительного сопла, чем обеспечивается более плавный разгон и интенсивное перемешивание суспензии с воздухом с уменьшением потерь на удар. Схема струйного аппарата приведена на рис. 1.

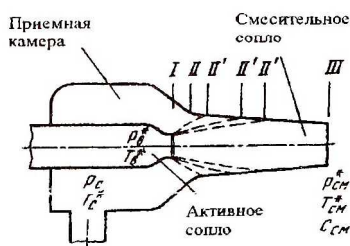


Рис. 1. Расчётная схема струйного аппарата

В результате перемешивания воздуха и суспензии в смесительном сопле струйного аппарата образуется трехфазная смесь из жидкости, воздуха и абразивных частиц. Для

определения скорости и параметров состояния смеси в выходном сечении смесительного сопла воспользуемся уравнениями сохранения энергии, количества движения и неразрывности. Обозначим параметры воздуха и суспензии в сечении I-I индексом 1, а параметры смеси в выходном сечении - индексом 3. Примем следующие допущения [1...4]: 1) стенки сопел нетеплопроводны; 2) поля скоростей и давлений в сечениях I и III равномерны; течение в соплах одномерное, силы трения отсутствуют; 3) процесс смешения является механическим и не сопровождается химическими превращениями; 4) активный газ является идеальным; 5) частицы жидкости и абразива равномерно распределены по объему смеси и находятся в состоянии теплового и механического равновесия с газом; 6) теплоемкость суспензии равна теплоемкости жидкой фазы; 7) статическое давление в смесительном сопле изменяется по линейному закону в зависимости от площади сечения

Равновесную многофазную смесь, состоящую из газа и примесей, даже при наличии значительного количества жидкой и твердой фаз, можно рассматривать как газ, свойства которого зависят от объемного содержания примеси. Для определения параметров состояния гидроабразивной смеси применимы законы газовой динамики с учетом поправок, вносимых наличием распределенных по объему абразивных частиц и капель жидкости [3,5].

Уравнение количества движения для сечений I и III с учетом силы реакции стенок сужающейся части смесительного сопла и приемной камеры можно записать в следующем виде:

$$m_{\sigma 1} C_{\sigma 1} + p_{\sigma 1} F_1 + m_{c1} C_{c1} + p_{c1} (F_k + F_1) - P = m_{cm3} C_{cm3} + p_3 F_3,$$

где $m_{\sigma 1}$, m_{c1} , m_{cm3} - массовые расходы воздуха, суспензии и смеси соответственно; $C_{\sigma 1}$, $p_{\sigma 1}$ - скорость и давление воздуха в выходном сечении активного сопла; C_{c1} , p_{c1} - скорость и давление суспензии; C_{cm3} , p_3 - скорость и давление смеси в выходном сечении смесительного сопла; F_k - площадь приемной камеры в сечении I; F_1 , F_3 - площади сечений активного и смесительного сопел; P - сила реакции стенок.

В первом приближении с учетом того, что истечение смеси происходит в окружающую среду с давлением p_n , силу реакции стенок можно определить по следующей формуле [3]:

$$P = \frac{p_n + p_{c1}}{2} (F_3 - F_k).$$

Выразив импульсы потоков воздуха и смеси через газодинамические функции, получим

$$\frac{\kappa+1}{2\kappa} m_{\text{в1}} a_{\text{в1}}^* \left(\lambda_{\text{в1}} + \frac{1}{\lambda_{\text{в1}}} \right) + m_{\text{с1}} C_{\text{с1}} + p_{\text{с1}} (F_{\kappa} + F_1) + \frac{P_n + p_{\text{с1}}}{2} (F_3 - F_{\kappa}) =$$

$$= \frac{\chi_{\text{см}} + 1}{2\chi_{\text{см}}} m_{\text{см3}} a_{\text{см3}}^* \left(\lambda_{\text{см3}} + \frac{1}{\lambda_{\text{см3}}} \right), \quad (1)$$

где $\kappa, \chi_{\text{см}}$ показатели изоэнтропы воздуха и смеси; $a_{\text{в}}^*, a_{\text{см}}^*$ - критические скорости истечения воздуха и смеси; $\lambda_{\text{в1}}, \lambda_{\text{см3}}$ - безмерные скорости воздуха и смеси.

Массовый расход воздуха через суживающееся сопло и критические скорости истечения воздуха и смеси могут быть определены по формулам:

$$m_{\text{в1}} = \mu_a \sqrt{\frac{\kappa}{R_{\text{в}}}} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \frac{p_{\text{в1}}^* F_1}{\sqrt{T_{\text{в}}^*}} q(\lambda_{\text{в1}}) = \mu_a 4,0408 \cdot 10^{-2} \frac{p_{\text{в1}}^* F_1}{\sqrt{T_{\text{в}}^*}} q(\lambda_{\text{в1}}), \quad (2)$$

$$a_{\text{в1}}^* = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} R_{\text{в}} T_{\text{в}}^*}, \quad (3)$$

$$a_{\text{см3}}^* = \sqrt{\frac{2\chi_{\text{см}}}{\chi_{\text{см}}+1} R_{\text{см}} T_{\text{см}}^*}, \quad (4)$$

где μ_a - коэффициент расхода активного сопла; $p_{\text{в1}}^*$ - давление торможения воздуха; $T_{\text{в}}^*, T_{\text{см}}^*$ - температуры торможения воздуха и смеси; $q(\lambda_{\text{в1}})$ - приведенный расход; $R_{\text{в}}, R_{\text{см}}$ - газовые постоянные воздуха и смеси.

В реальных условиях струйной ГАО на входе в струйный аппарат температуры торможения воздуха и суспензии равны температуре окружающей среды T_n . В то же время истечение смеси происходит в окружающую среду, поэтому можно считать, что температура торможения смеси также равна T_n .

Теплофизические свойства смеси зависят от соотношения массовых расходов воздуха и суспензии, которые связаны между собой через коэффициент эжекции $K_{\text{см}} = \dot{m}_{\text{в}} / \dot{m}_{\text{с}}$. С учетом расходов воздуха и суспензии удельные теплоемкости, показатель изоэнтропы и газовую постоянную смеси определяем следующим образом [1,3,6]:

$$c_{p_{см}} = \frac{K_{см} c_{pв} + c_{жс}}{K_{см} + 1}, \quad (5)$$

$$c_{v_{см}} = \frac{K_{см} c_{vв} + c_{жс}}{K_{см} + 1}, \quad (6)$$

$$\chi_{см} = \frac{K_{см} c_{pв} + c_{жс}}{K_{см} c_{vв} + c_{жс}}, \quad (7)$$

$$R_{см} = \frac{K_{см}}{K_{см} + 1} (c_{pв} - c_{vв}) = \frac{K_{см}}{K_{см} + 1} R_g, \quad (8)$$

где $c_{pв}$, $c_{vв}$ - удельные теплоемкости воздуха при постоянном давлении и объеме; $c_{жс}$ - теплоемкость суспензии (жидкости).

Расход гидроабразивной смеси определяем из уравнения неразрывности

$$m_{см3} = m_{г1} + m_{с1}, \text{ откуда}$$

$$m_{см3} = \frac{K_{см} + 1}{K_{см}} m_{г1} \quad (9)$$

Для приведенной скорости смеси на выходе из смесительного сопла после преобразования уравнения (1) получаем:

$$\lambda_{см3} = 0.5 \left(J \pm \sqrt{J^2 - 4} \right), \quad (10)$$

$$\text{где } J = \frac{2 \chi_{см} K_{см}}{a_{см}^* (\chi_{см} + 1) (K_{см} + 1) m_{г1}} \left[\frac{K + 1}{2K} m_{г1} a_g^* \left(\lambda_{г1} + \frac{1}{\lambda_{г1}} \right) + \frac{m_{г1}^2}{K_{см}^2 \rho_c F_k} + \right. \\ \left. + p_{с1} (F_k + F_l) - 0.5 (p_n + p_{с1}) (F_3 - F_k) \right];$$

ρ_c - плотность суспензии.

Уравнение (10) дает два значения приведенной скорости смеси: $\lambda_{см3} > 1$ - сверхзвуковое истечение; $\lambda_{см3} < 1$ - дозвуковое истечение. Скорость гидроабразивной смеси в выходном сечении смесительного сопла для обоих случаев течения определяется по следующей формуле:

$$C_{см3} = \lambda_{см3} a_{см}^*. \quad (11)$$

Уравнение (2.9) запишем в виде:



Рис. 2. Расходные характеристики

Таким образом, имея систему уравнений (2) ... (12), можно по известным параметрам воздуха и суспензии на входе в струйный аппарат определить параметры состояния гидроабразивной смеси в выходном сечении смесительного сопла.

Скорость истечения смеси, в основном, зависит от режима работы активного сопла струйного аппарата и расходов воздуха и суспензии. Определение расхода и параметров состояния на срезе активного сопла по известным давлению и температуре перед соплом не представляет трудностей. В то же время теоретическое определение расхода суспензии через струйный аппарат весьма сложно, так как при прочих равных условиях расход суспензии зависит от режима работы активного сопла. Действительно, при $p_a^* = 0$ расход суспензии можно определить по известным формулам для истечения жидкости из насадков. При докритическом истечении статическое давление воздуха в выходном сечении сопла будет равно давлению суспензии. Смешанный поток воздуха и суспензии с неравномерным профилем скорости заполнит проходное сечение смесительного сопла в некотором сечении II (см. рис.1), положение которого будет в основном определяться давлением подачи суспензии. Проходное сечение между внешней границей воздушной струи и стенками смесительного сопла будет изменяться незначительно. При сверхкритическом перепаде давлений за активным соплом образуется сверхзвуковая "бочка", положение границ которой будет зависеть от степени нерасчетности сопла. С увеличением давления перед активным соплом сечение II будет смещаться против потока, вследствие чего расход суспензии будет переменной величиной, зависящей от p_a^* [2]. При некотором значении давления струя воздуха займет все входное сечение

$$\rho_{смз} C_{смз} F_3 = \frac{(K_{см} + 1)m_{\theta 1}}{K_{см} a_{см}^* q(\lambda_{смз}) F_3},$$

где $\rho_{смз}$ - плотность смеси в выходном сечении смесительного сопла.

Выразив плотность смеси через параметры торможения, получим значение давления торможения смеси в выходном сечении для дозвукового и сверхзвукового случаев истечения:

$$p_{смз} = \frac{(K_{см} + 1)m_{\theta 1}}{K_{см} a_{см}^* q(\lambda_{смз}) F_3} \quad (12)$$

смесительного сопла, наступит режим “запирания” и подача суспензии прекратится. Подтверждением этому служат расходные характеристики струйного аппарата полученные экспериментальным путём (рис.2). Расходные характеристики позволяют определять коэффициент эжекции, используемый в формулах для расчета скорости истечения и параметров состояния гидроабразивной смеси.

Так как уравнения (10), (12) дают значения скорости и давления торможения смеси для дозвукового и сверхзвукового потоков, вопрос о выборе режима течения является весьма важным. Скорость звука в гидроабразивной смеси зависит от режима работы струйного аппарата. С увеличением давления воздуха перед активным соплом скорость звука в смеси также увеличивается и в пределе (при $K_{св}=0$) стремится к скорости звука в воздухе. Струя воздуха, выходящая из активного сопла, взаимодействуя с суспензией и ускоряя ее, будет тормозиться, давление торможения в струе будет падать, а статическое давление возрастать. Если предположить, что при дозвуковом режиме истечения воздуха из активного сопла в проточной части смесительного сопла в смешанном потоке не возникает скачка уплотнения, то режим истечения смеси в первом приближении можно определить по отношению давления торможения суспензии к давлению окружающей среды. При сверхкритическом перепаде давлений на активном сопле в проточной части смесительного сопла возможно появление скачков уплотнения. Скорость воздушной струи после скачка становится дозвуковой, но для гидроабразивной смеси она может быть сверхзвуковой. Если длина смесительного сопла достаточно велика (более 10...12 калибров), то в системе скачков уплотнения, возникающих в смешанном потоке, осуществляется переход к дозвуковому течению. Граница перехода от дозвукового к сверхзвуковому истечению может быть определена экспериментально путем измерения скорости струи на выходе из смесительного сопла. В таблице 1 приведены результаты расчётов и экспериментов по определению скорости истечения гидроабразивной смеси. Скорость гидроабразивной смеси в выходном сечении смесительного сопла определялась тремя методами: путем измерения силы удара струи ($C_{смп}$); по известным расходным характеристикам и эпюрам давления торможения ($C_{смп}^*$); расчетным путем по формулам (10), (11) ($C_{см}$ - расчетная скорость смеси; $a_{см}^*$ - критическая скорость истечения смеси).

Из таблицы видно, что с увеличением давления воздуха скорость гидроабразивной смеси на выходе из смесительного сопла струйного аппарата увеличивается, причем на всех режимах работы

активного сопла в выходном сечении смесительного сопла реализуется звуковой (при $p_a^* = 0,1$ МПа) или сверхзвуковой режим истечения. Достоверность полученных результатов подтверждается весьма близкими значениями (разброс не более 5 %) скоростей $C_{см}$ и $C_{см}^*$, которые были определены экспериментальным путем двумя независимыми методами. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями скорости гидроабразивной смеси не превышает 10...12 %, что является вполне удовлетворительным.

Таблица 1
Скорость гидроабразивной смеси в выходном сечении смесительного сопла

Давление воздуха на входе в активное сопло, МПа	Скорость гидроабразивной смеси, м/с			
	$C_{см}$	$C_{см}^*$	$C_{см}$	$a_{см}^*$
0,1	93,5	97,8	111,2	111,2
0,2	149,8	155,9	150,1	140,3
0,3	196,4	201,9	194,2	162,7
0,4	235,2	246,6	236,5	185,9
0,5	271,3	282,5	294,3	215,3

Полученные результаты могут быть использованы при расчетах скорости движения гидроабразивной струи в воздухе, расчетах массового съема металла и моделирования процесса формирования микрорельефа обрабатываемой поверхности.

Список литературы

1. Дейч М.Е. Техническая газодинамика - М.: Энергия, 1974.-592 с.
2. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976, 824с.
3. Васильев Ю.Н. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения - В кн.: Лопаточные машины и струйные аппараты. - М.: Машиностроение, 1971, с.175-261.
4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй -М.: Физматгиз, 1960.- 716 с.
5. Стернин и др. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами -М.: Машиностроение, 1980.-172 с.
6. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Газодинамика двухфазных сред М.: Энергоиздат, 1981.- 472 с.