

виях теплоизоляции работала плохо [2] (пропускала тепловой поток) и, следовательно, происходило падение $T_{ог}$, а ВТ стала неадиабатной. Понижение температуры горячего потока на выходе из дроссельного крана $T_{ог}$ приводит к повышению температурной эффективности ВТ.

Следовательно, недостаточная изоляция привела к изменению угла наклона экспериментальной кривой $\Delta t_x = f(T_{ог}, \mu)$ и расхождение ее с расчетной кривой $\Delta t_x = f(T_{ог}, \mu)$ в области повышенных значений температуры воздуха на входе в ВТ.

Таким образом, температурная эффективность вихревой трубы Δt_x прямо пропорциональна температуре газа на входе в вихревую трубу при постоянстве всех других параметров.

Л и т е р а т у р а

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969.
2. Бродянский В.М., Мартынов А.В. Зависимость эффекта Ранка-Хилша от температуры. - Теплоэнергетика, 1964, № 6.
3. Чижиков Ю.В., Воронин В.Г., Опарина М.И. Разработка стандартной методики расчета адиабатной вихревой трубы. - Материалы III Всесоюзной конференции по вихревому эффекту. - Куйбышев, 1981, с. 31-33.
4. Кузнецов В.И. К вопросу о взаимодействии периферийных и осевых слоев газа в противоточной вихревой трубе. - Изв. вузов, Машиностроение, 1972, № 10.
5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. - М.: Наука, 1976.- 888 с.
6. Кузнецов В.И. Метод расчета теплообмена в вихревой трубе. - Материалы III Всесоюзной конференции по вихревому эффекту. - Куйбышев, 1981, с. 36-38.
7. Кузнецов В.И. Методика расчета вихревой трубы. - Труды I Всесоюзной конференции по вихревому эффекту. - Куйбышев: КуАИ, 1974.

УДК 621.7.02

А.П.М е р к у л о в

ГАЗОДИНАМИКА ВИХРЕВОЙ МОЩЕЙ ГОЛОВКИ

Специфические свойства круговых потоков газа: высокие окружные скорости течения в замкнутом объеме, радиальный градиент статического давления, интенсивное спиральное течение к оси потока пограничного слоя - могут с успехом использоваться для обработки плоских или слабо искривленных поверхностей (мойка различными растворами, полировка, электрохимическая

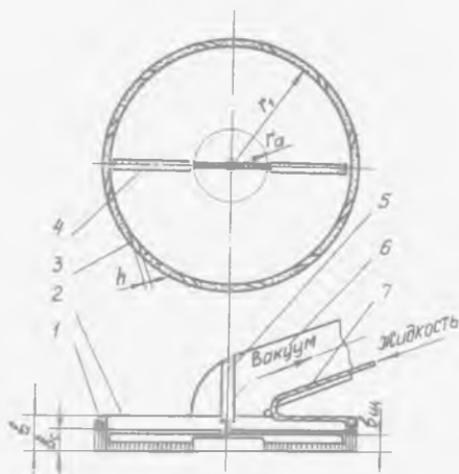
обработка и т.д.). Существующие методы мойки не могут удовлетворить всех требований, предъявляемых в настоящее время к процессу мойки: подачу свежего раствора и полный отвод из зоны мойки и утилизация или нейтрализация вредных для окружающей среды и здоровья людей загрязненных продуктов мойки, отвод паров летучей моющей жидкости из зоны мойки, обеспечение стабильности усилия прижатия моющего устройства к обрабатываемой поверхности, исключение возможности повреждения поверхности моющим устройством.

Разработанный нами вихревой метод очистки поверхностей удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям. Основным исполнительным органом в нем является изображенная на рис. 1 вихревая моющая головка (ВМГ), содержащая корпус 2, в периферийном кольцевом пазу которого установлено уплотнение 1, выполненное из щетины или резины и имеющее каналы для подачи моющей жидкости из кольцевого паза на наружный торец уплотнения.

В уплотнении имеются сопловые тангенциальные каналы 3. Выходное отверстие в верхней присоединительной части корпуса соединено с патрубком 6 отбора воздуха и продуктов мойки из рабочей полости ВМГ.

На укрепленной на корпусе с помощью перемычек втулке 5 установлена свободно вращающаяся на своей оси щетка-активатор 4. К полости кольцевого паза подсоединена трубка 7 подачи моющей жидкости. Для функционирования ВМГ соединяется патрубком через гибкий (пылесосный) шланг с вакуумирующей системой установки, а трубка 7 - с напорной магистралью подачи моющей жидкости.

При наложении ВМГ на обрабатываемую поверхность в ее рабочей полости создается вакуум и воздух из окружающей среды с высокой скоростью стекает через тангенциальные сопловые каналы, образуя интенсивный круговой поток, текущий по спирали к присоединительному выходному отверстию. За счет кругового движения в рабочей полости ВМГ (и над обрабатываемой поверхностью соответственно) создается заметный радиальный градиент статического давления, приводящий к интенсивному радиально-кру-



Р и с. 1. Вихревая моющая головка

говому течению пограничного слоя, возникающего на обрабатываемой поверхности.

При подаче мощней жидкости в полость кольцевого паза она за счет капиллярных сил поступает вдоль щетины (или по каналам в резинном уплотнении) на обрабатываемую поверхность и течет в виде кидкого пограничного слоя этой поверхности по спиральному пути к оси, в присоединенной области воздушный поток разрушает этот слой и в каплеобразном виде уносит в патрубок 6 отбора продуктов мойки.

Дополнительное механическое воздействие на обрабатываемую поверхность осуществляется щеткой-активатором 4, которая увлекается круговым потоком и, вращаясь с высокой скоростью (до 10 тыс. об/мин), интенсивно очищает обрабатываемую поверхность.

За счет возникающего в рабочей полости вакуума корпус ВМГ интенсивно прижимается к обрабатываемой поверхности и требует только усилия для перемещения по ней.

Благодаря организованному круговому движению воздуха в ВМГ имеется возможность ее инженерного газодинамического расчета, обеспечить выбор оптимальных геометрических соотношений и термодинамических параметров. Для функционирования ВМГ используются небольшие перепады давления, создающие в круговом потоке умеренные скорости течения, не превышающие 100 м/с, поэтому с достаточным основанием мы можем пренебречь влиянием сжимаемости воздуха и принять условие $\rho = const$. Также пренебрежем вязкостью газа.

Основной задачей расчета являются определение скорости втекания воздуха через тангенциальные сопла и распределения скорости и давления по радиусу рабочей полости ВМГ.

Исходная система уравнений движения

$$v_r \frac{dr}{dr} - \frac{v_z^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr}; \quad (1)$$

$$\frac{dv_z}{dr} + \frac{v_z}{r} = 0, \quad (2)$$

сплошности

$$\frac{d(r v_r)}{dr} = 0 \quad (3)$$

Решение для уравнения (2)

$$v_z = \frac{C_1}{r}; \quad \frac{dv_z}{dr} = -\frac{C_1}{r^2} \quad (4)$$

Решение для уравнения (3)

$$r v_r = \frac{C_2}{r}; \quad \frac{dv_r}{dr} = -\frac{C_2}{r^2} \quad (5)$$

После подстановки этих решений в уравнение (1) и преобразований можно получить $\frac{d}{dr} \left(\frac{v_z^2 + v_r^2}{2} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr}$

и после интегрирования найти выражение для распределения статического давления по радиусу:

$$P = P_1^* - \frac{\rho}{2r^2} (C_1^2 + C_2^2), \quad (6)$$

где P_1^* - полное давление в окружающей среде перед тангенциальными каналами.

Проведем замену

$$\bar{r} = \frac{r}{r_1}; \quad \bar{r}_a = \frac{r_a}{r_1}; \quad \Delta P_0 = P_1^* - P_a,$$

где P_a - статическое давление в выходном отверстии ВМГ, и используя граничные условия, можно получить выражение для скорости истечения через тангенциальные каналы:

$$U_1^2 = \frac{2\bar{r}_a^2}{\rho} \Delta P_0. \quad (7)$$

Из выражений (4) и (7) получим выражение для распределения скорости

$$U^2 = \frac{U_1^2 M_1^2}{r^2} = \frac{\bar{r}_a^2}{\bar{r}^2} \frac{2\Delta P_0}{\rho}. \quad (8)$$

После подстановки в выражение (6) значений постоянных, найденных из граничных условий, можно получить такое выражение:

$$P = P_1^* - \frac{r_a^2}{r^2} \Delta P_0 \quad (9)$$

На рис. 2 представлены кривые распределения окружной и радиальной скоростей при $\Delta P_0 = 10^4$ Па; $\bar{r}_a = 0,3$. По значению U_1 можно определить и расход воздуха через тангенциальные каналы:

$$G = v_c h_{\Sigma} \rho U_1, \quad (10)$$

где v_c - осевая высота каналов;

h_{Σ} - суммарная по окружности ширина каналов.

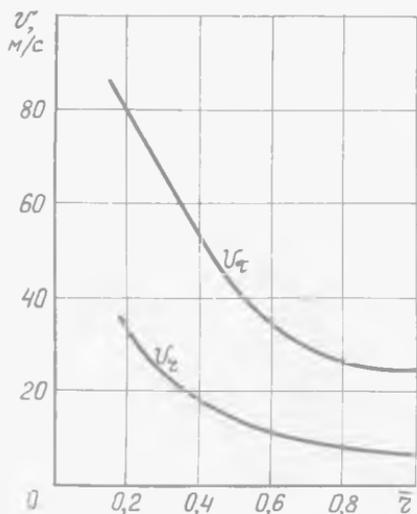
Угол наклона вектора скорости можно определить, выразив расход воздуха через радиальную скорость:

$$G = 2 \cdot 3,14 r_1 v_c \rho U_r,$$

а после замены полученного выражения выражением (10) получим

$$\frac{U_r}{U_1} = \frac{v_c h_{\Sigma}}{v_c 6,28 r_1} = \cos \alpha. \quad (11)$$

Учитывая выражения (4) и (5), можно заключить, что угол наклона остается постоянным по всему радиусу. Выразив радиальную скорость как производную радиуса по времени и приравняв выражению (5), после интег-



Р и с. 2. Распределение тангенциальной U_t и радиальной U_r скорости при $P_a = 0,06 \cdot 10^{-5}$ Па и $z_g = 0,23$

Усилие прижатия существенно зависит от относительного радиуса выходного отверстия. Интенсивность кругового потока определяется его моментом количества движения, который может быть выражен так:

$$M = \gamma \frac{2 \Delta P_0}{\rho} \bar{r}_a^2 \sin \alpha. \quad (15)$$

Если в полости ВМГ находится щетка-активатор, имеющая высоту $h_{щ}$ и радиальную протяженность от r_a до r_1 , можно оценить скорость ее вращения, предполагая, что в полости над щеткой господствует рассмотренное нами потенциальное течение.

Представленное на рис. 3 наложение скорости щетки на скорость потенциального потока позволяет выразить действующий на щетку момент сил воздушного потока в виде разности интегралов:

$$M_{щ} = \int_{r_a}^{r_1} (U_t - v_{щ})^2 \rho v_{щ} r dr - \int_{r_0}^{r_1} (U_t - v_{щ})^2 \rho v_{щ} r dr, \quad (16)$$

где r_0 - радиус равных скоростей щетки и потока.

После подстановки выражений для U_t и $v_{щ}$ перехода на относительные радиусы и интегрирования получим

рирования с использованием граничных условий можно получить выражение для времени пребывания частицы воздуха в полости ВМГ:

$$\tau_a = \frac{r_1 (1 - \bar{r}_a^2)}{2 U_t \cos \alpha}. \quad (12)$$

Выразив окружающую составляющую скорости как производную дуги по времени и используя выражение (4), после интегрирования получим выражение для угла φ_0 , описываемого частицей воздуха в полости ВМГ:

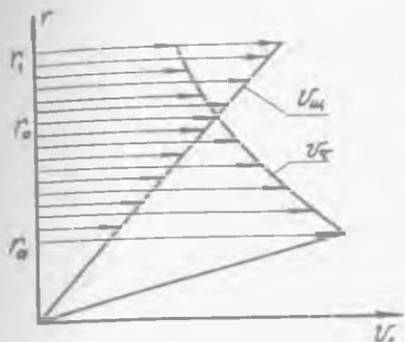
$$\varphi_0 = \operatorname{tg} \alpha \ln \frac{1}{\bar{r}_a}. \quad (13)$$

Усилие прижатия ВМГ к обрабатываемой поверхности выразится интегралом

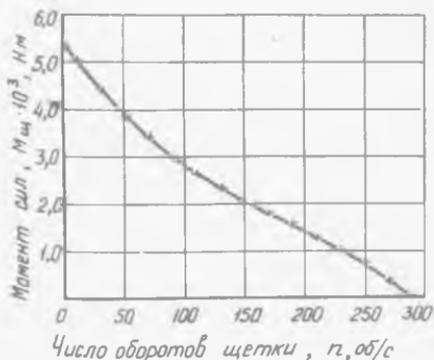
$$F = 6,28 \gamma \int_{r_a}^1 \Delta p \bar{r} d\bar{r} + 3,14 \bar{r}_a^2 \Delta P_0.$$

После подстановки из выражения (9) $\Delta p = P_1^* P = \frac{\bar{r}_a^2}{\bar{r}^2} \Delta P_0$ и интегрирования получим

$$F = 3,14 \gamma \bar{r}_a^2 \Delta P_0 \left(2 \ln \frac{1}{\bar{r}_a} + 1 \right) \quad (14)$$



Р и с. 3. Соотношение скорости щетки V_m и тангенциальной составляющей скорости потока V_t



Р и с. 4. Зависимость M_m от числа оборотов n

$$M_m = \rho v_m r_1^2 \left[v_t^2 \sin^2 \alpha \ln \frac{v_t \sin \alpha}{6,28 n \bar{r}_a} - 6,28 n v_t \sin \alpha \left(\frac{v_t \sin \alpha}{3,14 n} \bar{r}_a^2 - 1 \right) + \right. \\ \left. + 9,68 n^2 \bar{r}_a^2 \left(\frac{v_t^2 \sin^2 \alpha}{19,72 n^2} - \bar{r}_a^4 - 1 \right) \right] \quad (17)$$

На рис. 4 представлена зависимость M_m от числа ее оборотов n для $\Delta p_0 = 10^4$ Па; $r_1 = 0,05$ м; $v_m = 0,01$ м; $\bar{r}_a = 0,4$; $\cos \alpha = 0,1$. Пересечение кривой с осью n дает максимальное значение оборотов щетки при нулевом моменте ее сопротивления.

УДК 532.526.527

А.Н.Балалаев, А.Ю.Цыбров *

ВЛИЯНИЕ ТОРЦЕВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Необходимость расчета гурбулентного пограничного слоя газа, вращающегося на торцевой поверхности ВТ, связана с большим влиянием пристенных вторичных течений на эффективность работы этого устройства.

При расчете пограничного слоя вращающегося газа решалась система уравнений сохранения импульса, момента импульса и расхода:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\tau \int_0^{\delta} \rho U_t^2 dz \right) - \int_0^{\delta} \rho U_c^2 dz = -\tau \tau_{zz} \Big|_{z=0} - \tau \delta \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1)$$

* Работа выполнена под руководством проф. А.П.Меркулова