

6-17-2019

MATHEMATICAL MODELING OF GAS-DYNAMICS PROCESSES OCCURRING IN DISCRETLY POWERED CARRYING GAS BUFFER

Ye D. Chertov

Voronezh State University of Engineering Technology

O A. Nosov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>

Recommended Citation

Chertov, Ye D. and Nosov, O A. (2019) "MATHEMATICAL MODELING OF GAS-DYNAMICS PROCESSES OCCURRING IN DISCRETLY POWERED CARRYING GAS BUFFER," *Scientific-technical journal*: Vol. 22 : Iss. 2 , Article 45.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol22/iss2/45>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

УДК 532

MATHEMATICAL MODELING OF GAS-DYNAMICS PROCESSES OCCURRING IN DISCRETLY POWERED CARRYING GAS BUFFERYe.D. Chertov¹, O.A. Nosov², B.A. Alimatov², Ye.S. Tkachenko², S.M. Tolstolutskiy²¹Voronezh State University of Engineering Technology²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ДИСКРЕТНО ЗАПИТЫВАЕМОМ НЕСУЩЕМ ГАЗОВОМ БУФЕРЕ**Е.Д. Чертов¹, О.А. Носов², Б.А. Алиматов², Е.С. Ткаченко²,
С.М. Толстолицкий²¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород,**ДИСКРЕТ ЮКЛАНАДИГАН ТАШУВЧИ ГАЗ БУФЕРИДА ГАЗОДИНАМИК ЖАРАЁНЛАРНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ**¹Воронеж давлат мухандислик технологиялари университети²В.Г. Шухов номидаги Белгород давлат технология университети

Е.Д. Чертов, О.А. Носов, Б.А. Алиматов, Е.С.Ткаченко, С.М.Толстолицкий

Methods of reducing influence or total elimination of “air-gripper” and “broaching” effects in carrying gas buffer layer are considered in the article. Mathematical models allowing to determine the pressure distribution in the carrying gas buffer layer are given.

Keywords: carrying gas buffer, air-gripper, gas pressure, mathematical modeling, gas flow.

В статье рассматриваются методы снижения влияния или полного исключения влияния эффектов «пневмозахвата» и «прошивания» в несущем газовом буферном слое. Приведены математические модели, позволяющие определить распределение давления в несущем газовом буферном слое.

Ключевые слова: несущий газовый буфер, пневмозахват, давление газа, математическое моделирование, течение газа.

Мақолада ташувчи буфер газ қатламда «пневоушлаш» ва «тикиш» эффектларини камайтириш ёки бутунлай бартараф қилиш усуллари кўрилган. Ташувчи газ қатламидаги босимларни тақсимланишини аниқловчи математик моделлар келтирилган.

Таянч сўзлар: ташувчи газ буфери, пневмоушлаш, газ босими, математик моделлаштириш, газ оқими.

С целью снижения или полного исключения влияния эффектов “пневмозахвата” и “прошивания” в системах с несущим газовым буферным слоем необходимо устранить стационарность последнего, так как названные эффекты обусловлены инерцией течения газа и на их формирование требуется определённое время. Предлагается запитывать газовый буфер дискретно с частотой, исключающей возможность нежелательных явлений.

MECHANICS

Принципиальная возможность существования такой частоты определялась в ходе поисковых экспериментов.

Рассмотрим систему “цилиндрическое сопло – дискретно запитываемый газовый буферный слой – твердое тело”, представленный на рис. 1. Твердое тело 1 массой m имеет форму диска радиусом R и расположено на газовом буферном слое, образованном при истечении газа через выпускное сопло радиуса r_0 газораспределительной решетки - 2. Входное сечение сопла периодически перекрывается вращающейся плоской перфорированной заслонкой 3 с радиусом отверстия r_0 , что обуславливает периодическое изменение расхода газа в газовом буферном слое по определенному закону. Давление газа в питающем тракте P_k [9].

Здесь с точки зрения теории автоматического управления входными величинами $U(t)$ являются масса m и радиус R тела, радиус питающего сопла r , давление в питающем тракте P_k . Выходным параметром $y(t)$ является значение толщины газового буферного слоя h . Кроме того, на легкодеформируемые объекты действует возмущающее воздействие – колебание расхода газа в газовом буферном слое Q , обусловленное перекрыванием сопла заслонкой по определенному закону.

При разработке математической модели необходимо получить выражение распределения давления в газовом буферном слое легкодеформируемого объекта “цилиндрическое сопло – дискретно запитываемый несущий газовый буферный слой – твердое тело”. В качестве основной рабочей гипотезы примем следующую: дискретная подача газа через питающее сопло приводит к изменению характера распределения скоростей среды в газовом буферном слое. Это в свою очередь может привести к снижению или полному исключению вероятности появления эффекта пневмозахвата при определенных параметрах запитывания газового буферного слоя [7, 8, 10, 11].

Предположим, что при движении центра отверстия перфорации заслонки относительно геометрического центра входного отверстия питающего сопла изменение площади проходного сечения последнего будет происходить по гармоническому закону, то есть:

$$S_{откр} = S_{cp} + S_{cp} \sin(\omega_n t). \quad (1)$$

Так как расход газа в газовом буферном слое пропорционален площади сечения, то расход также будет изменяться по гармоническому закону.

Рассмотрим систему “цилиндрическое сопло – дискретно запитываемый газовый буферный слой – легкодеформируемый объект”, изображенный на рис. 2. Легкодеформируемый объект 1 расположен на газовом буферном слое, образованном при истечении газа через выпускное сопло газораспределительной решетки 2 с одним питающим соплом, при этом входное сечение сопла непрерывно перекрывается плоской заслонкой 3, что обуславливает периодическое изменение расхода газа в газовый буферный слой, вследствие чего в системе “цилиндрическое сопло – дискретно запитываемый газовый буферный слой – легкодеформируемый объект” возникают колебания с частотой, равной частоте перекрытия сопла заслонкой.

Входными параметрами системы “цилиндрическое сопло – дискретно запитываемый газовый буферный слой – легкодеформируемый объект” являются масса m и радиус R удерживаемого тела, реологические характеристики тела, характеризующиеся индексом течения и коэффициентом консистенции, радиус питающего сопла r , давление в питающем

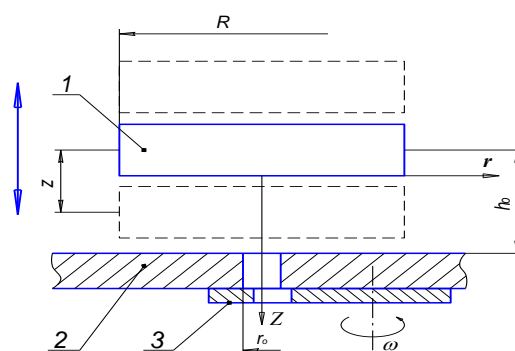


Рис. 1. Система “цилиндрическое сопло – дискретно запитываемый газовый буферный слой – твердое тело”: 1 – твердое тело; 2 – решетка газораспределительная; 3 – заслонка.

MECHANICS

тракте Рк. Выходным параметром $y(t)$ является зависимость толщины газового буферного слоя от текущего радиуса $h(r)$. На легкодеформируемый объект действует возмущающее воздействие – колебание расхода газа в газовом буферном слое Q , обусловленное перекрытием сопла заслонкой по гармоническому закону.

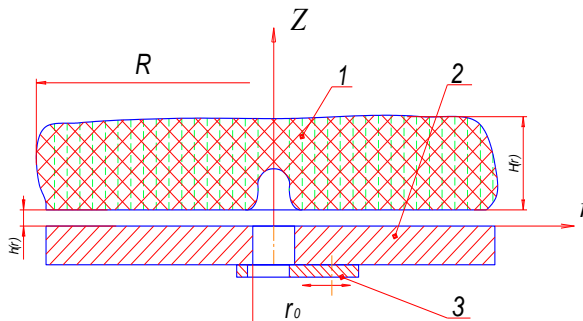


Рис. 2. Система “сопло – дискретно запитываемый газовый буферный слой – легкодеформируемый объект”: 1 – легкодеформируемый объект; 2 –газораспределительная решетка; 3 – заслонка.

Условие бесконтактного удержания легкодеформируемого объекта в этом случае можно сформулировать следующим образом:

$$A(r, t, n, K, P_k) \leq h_0 - Rz. \tag{2}$$

Решение задачи можно свести к определению частоты перекрытия заслонкой сопла, при которой будет выполняться условие бесконтактного удержания легкодеформируемого объекта на газовом буферном слое.

Рассмотрим звено “круглое отверстие – плоская заслонка” (рис. 3) Система “плоская заслонка - цилиндрическое сопло – газовый буферный слой”. Входные параметры системы: радиус питающего сопла, радиус отверстия перфорации заслонки, угловая скорость вращения заслонки и выходные параметры этого звена: зависимость площади открытого сечения сопла от времени. Круглое отверстие радиусом R_1 перекрывается плоской круглой заслонкой радиусом R_2 , при этом центр заслонки равномерно движется по радиусу R_3 вокруг неподвижной точки O с некоторой постоянной угловой скоростью ω_n [8, 9].

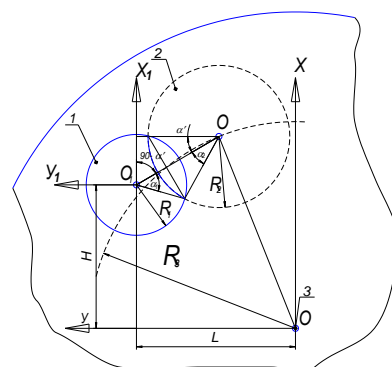


Рис. 3. Система “сопло - заслонка”: 1 – сопло; 2 – заслонка; 3 – центр вращения заслонки.

Определим изменение площади открытой части сопла $S_{откр}$ за один период перекрытия отверстия заслонкой.

Из рис. 3 видно, что $S_{откр}$ определяется суммой двух круговых сегментов окружностей сопла и заслонки.

Очевидно, что:

$$S_{откр} = R_1^2 \left(\alpha_1 - \frac{\sin(2\alpha_1)}{2} \right) + R_2^2 \left(\alpha_2 - \frac{\sin(2\alpha_2)}{2} \right) \tag{3}$$

можно определить из системы уравнений:

$$\begin{cases} R_3 \sin \omega_n t + R_2 \cos(\alpha' + \alpha_2) = L - R_1 \cos(\alpha_1 - \alpha') \\ R_3 \cos \omega_n t - R_2 \sin(\alpha' + \alpha_2) = H - R_1 \sin(\alpha_1 - \alpha') \end{cases} \tag{4}$$

где

$$\alpha' = \arcsin \left(\frac{R_3 \cos \omega_n t - H}{\sqrt{(L - R_3 \sin \omega_n t)^2 + (H - R_3 \cos \omega_n t)^2}} \right) \tag{5}$$

MECHANICS

Решая совместно выражения (3), (4) и (5), можно определить открытую площадь сечения отверстия в любой момент времени.

Для того чтобы изменение площади открытого сечения сопла подчинялось закону (3), необходимо выполнение следующего равенства:

$$T_0 = T_3 = 0.$$

Это возможно в следующих случаях:

- если $R_2 > R_1$, $\alpha_1 \geq \alpha_2$, тогда в момент полного перекрытия центры отверстия, заслонки и вращения заслонки лежат на одной линии, а точки, наиболее удаленные от центра вращения заслонки, лежащие на окружностях, ограничивающих отверстие и заслонку, совпадают и принадлежат линии, проходящей через центры этих окружностей;

- если $R_1 = R_2 = R$; $\alpha_1 = \alpha_2$, тогда траектория движения центра заслонки должна проходить через центр отверстия. Площадь открытого сечения можно определить по следующей зависимости, полученной из выражения для определения площади кругового сегмента:

$$S_{откр} = \frac{2}{3} (2R - \omega_n R_3 t) \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\omega_n R_3 t}{2} \right)^2} \quad (6)$$

Подставив зависимости (4)–(5) в уравнение (3), получим выражение для определения площади открытой части отверстия. Однако использование зависимостей (3)–(5) или (6) в дальнейших преобразованиях весьма затруднительно, так как это однозначно приведет к чрезвычайному усложнению решения. В этом случае единственно правильным решением видится аппроксимация численных значений, полученных при решении зависимостей (3)–(5) или (6) с помощью одного из методов интерполирования.

Полученные зависимости аппроксимировались методом интерполяционных тригонометрических многочленов, так как зависимости, полученные с помощью других методов, например с помощью полиномов, дают хорошее схождение с расчетными значениями лишь в узлах интерполирования, кроме того, они также достаточно сложны при использовании в математических преобразованиях.

В результате обработки расчетных данных с помощью метода тригонометрических интерполяционных многочленов получена общая зависимость вида:

$$S_{откр} = S_{cp} + S_{cp} \sin(\omega t) \quad (7)$$

Адекватность аппроксимированной зависимости оценивалась с помощью коэффициента корреляции, который составил $k=0,98$. Адекватность подтверждена.

Для определения давления в газовом буферном слое переменной толщины воспользуемся системой уравнений Навье-Стокса в цилиндрической системе координат для случая осесимметричного течения газа с учетом принятых допущений [5, 6]:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial V_r}{\partial t} + \rho V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r V_r)}{\partial r} = 0; \\ \frac{\partial p}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{p}{\rho \chi} = \frac{p_a}{\rho_a} \quad (9)$$

Из закона Пуазейля [6]:

$$v = 4V_{max} \left(\frac{zh - z^2}{h^2} \right) \quad (10)$$

MECHANICS

следует, что распределение скорости по высоте газового буферного слоя носит параболический характер. Тогда выражение, описывающее распределение скорости по высоте СГБ, можно записать в следующем виде [1, 2, 4, 5]:

$$v_r = \frac{C_1}{r} (z^2 - hz). \quad (11)$$

Подставляя выражение для распределения скорости по высоте газового буферного слоя (11) в систему (8) и исключая плотность ρ , с учетом (11) получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{p\rho_a}{p_a} \frac{h}{r} \frac{\partial(hC_1)}{\partial t} - \frac{p\rho_a}{p_a} \frac{C_1^2}{r^3} (z^2 - hz)^2 = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2\mu C_1}{r}; \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{C_1}{r} (z^2 - hz) \frac{\partial p}{\partial r} = 0; \end{cases} \quad (12)$$

или усредняя по z , получим:

$$\begin{cases} -\frac{p\rho_a}{p_a} \frac{h}{r} \frac{\partial(hC_1)}{\partial t} - \frac{h^4}{30} \frac{p\rho_a}{p_a} \frac{C_1^2}{r^3} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2\mu C_1}{r}; \\ \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{h^2}{6} \frac{C_1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Решим второе уравнение системы, для этого перепишем его в виде:

$$\frac{1}{h^2 C_1} p'_t - \frac{1}{6r} p'_r = 0. \quad (14)$$

Запишем для уравнения (14) характеристическую систему:

$$\frac{dt}{1/(h^2 C_1)} = \frac{dr}{-1/(6r)} = \frac{dp}{0}. \quad (15)$$

Из (15) следует:

$$\begin{aligned} (h^2 C_1) dt &= -(6r) dr; \\ h^2 dt &= \frac{dp}{0}. \end{aligned} \quad (16)$$

Решая уравнения (16), получим:

$$\begin{aligned} \int (h^2 C_1) dt &= -3r^2 + K_1; \\ p &= K_2. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда в общем виде решение второго уравнения системы (13):

$$P' = F \left(\int h^2 dt + \frac{3r^2}{C_1}, p \right). \quad (18)$$

Так как один интеграл зависит от неизвестной функции, а другие нет, то решение (18) можно записать в виде:

$$p = f \left(\int h^2 dt + \frac{3r^2}{C_1} \right). \quad (19)$$

Полученное решение полностью удовлетворяет второму уравнению системы (13).

Для нахождения частного решения уравнения (19) разложим в степенной ряд полученную функцию в окрестности точки $x_0 = 3r_2$:

MECHANICS

$$\begin{aligned}
 p(r,t) = & P_1(3r^2) + \frac{P_2}{1!}(3r^2) \left[(h^2 C_1 dt + 3r^2 - 3r^2) \right] + \\
 & + \frac{P_3}{2!}(3r^2) \left[(h^2 C_1 dt + 3r^2) - 3r^2 \right]^2 + \frac{P_4}{3!}(3r^2) \left[(h^2 C_1 dt + 3r^2) - 3r^2 \right]^3 + \\
 & + \frac{P_5}{3!}(3r^2) \left[(h^2 C_1 dt + 3r^2) - 3r^2 \right]^4.
 \end{aligned} \tag{20}$$

Подставим (20) в первое уравнение системы (13):

$$\begin{aligned}
 & -\frac{h}{r} \frac{\rho a}{p a} \left(P_1(3r^2) + \frac{P_2}{1!}(3r^2) (h^2 C_1 dt) + \frac{P_3}{2!}(3r^2) (h^2 C_1 dt)^2 + \frac{P_4}{3!}(3r^2) [(h^2 C_1 dt)^3] \right) \frac{\partial(hC_1)}{\partial t} - \\
 & -\frac{h^4}{30} \frac{\rho a}{p a} \left(P_1(3r^2) + \frac{P_2}{1!}(3r^2) (h^2 C_1 dt) + \frac{P_3}{2!}(3r^2) [(h^2 C_1 dt)^2] + \frac{P_4}{3!}(3r^2) [(h^2 C_1 dt)^3] \right) \frac{C_1^2}{r^3} = \\
 & = -\left(P_1'(3r^2) 6r + \frac{P_2'}{1!}(3r^2) 6r (h^2 C_1 dt) + \frac{P_3'}{2!}(3r^2) 6r [(h^2 C_1 dt)^2] + \frac{P_4'}{3!}(3r^2) 6r [(h^2 C_1 dt)^3] \right) + \\
 & + \frac{2\mu C_1}{r}.
 \end{aligned} \tag{21}$$

После некоторых математических преобразований получим:

$$\begin{aligned}
 & -\int \left[\frac{h^4 \rho a C_1^2}{10 p a x^2} + \frac{\rho a}{p a 2x} \frac{\partial(h^2 C_1)}{\partial t} \right] dx \\
 P_2 = e & \times \left(\frac{1}{h^2 C_1} \left(P_1(x) \left(\frac{3h^3 \rho a C_1^2}{10 p a x^2} + \frac{\rho a}{p a 2x} \frac{\partial^2(h^2 C_1)}{\partial t^2} \right) + \frac{2\mu}{x} \frac{\partial C_1}{\partial t} \right) \times \right. \\
 & \left. \int \left[\frac{h^4 \rho a C_1^2}{10 p a x^2} + \frac{\rho a}{p a 2x} \frac{\partial(h^2 C_1)}{\partial t} \right] dx \right) dx + C_3.
 \end{aligned} \tag{22}$$

Оценивая порядок малости слагаемых уравнения (21), ограничимся линейными членами. Подставляя полученные выражения для коэффициентов P_1 и P_2 в уравнение (20), получим выражение, описывающее распределение давления по радиусу и времени. Это выражение содержит неизвестные функции толщины буферного газового слоя h и коэффициента C_1 от времени.

Для их определения воспользуемся следующим подходом. В работах [3, 9] получено выражение распределения давления при стационарном режиме подачи газа. Сравнивая коэффициенты при одинаковых слагаемых, получим:

$$C_1 = \frac{3(Q_{cp} + Q_{cp} \sin(\omega t))}{\pi h^3}. \tag{23}$$

Для определения неизвестной функции толщины газового буферного слоя воспользуемся подходом, изложенным в работах [4, 5].

Рассмотрим систему “плоская перфорированная заслонка – цилиндрическое сопло – газовый буферный слой” как систему с одной степенью свободы, обладающую упругими и вязкостными свойствами. Такой подход вполне приемлем, если отклонение тела от стационарного положения невелико по сравнению с линейными размерами удерживаемого объекта, так что зависимость главного вектора сил давления от толщины газового буферного слоя можно считать линейной [5].

Выражение для определения упругой силы, действующей на твердое тело со стороны буферного слоя, можно записать:

$$\begin{aligned}
 F & = -Kh; \\
 \frac{\Delta F}{\Delta h} & = \frac{F - F_0}{h - h_0} = -K.
 \end{aligned} \tag{24}$$

Из выражения (24) видно, что тело на газовом буферном слое ведет себя как пружина с упругой постоянной K .

MECHANICS

С другой стороны, сближение или удаление рабочих поверхностей твердого тела и газораспределительной решетки с единичным отверстием обуславливает возникновение силы:

$$F = -C_1 h + C_2 \dot{h}. \quad (25)$$

Выражение для силы F можно записать в виде:

$$F = -Kz - 2C\dot{z}. \quad (26)$$

Следовательно, газовый буферный слой можно охарактеризовать коэффициентом упругости K и показателем демпфирования C .

Показатель демпфирования C учитывает вязкостные свойства газов:

$$C = \mu\pi R. \quad (27)$$

Из теории гидрогазодинамики известно, что для оценки упругости жидкостей и газов используется модуль упругости G – отношение изменения давления ΔP к относительному изменению плотности $\Delta\rho/\rho$. Переходя от конечных разностей к дифференциалам, получим:

$$G = \frac{dp}{d\rho/\rho}. \quad (28)$$

При изотермическом процессе $G=P$. Тогда в цилиндрической системе координат можно записать:

$$K = 2G\pi R = 2p\pi R. \quad (29)$$

Так как давление в газовом буферном слое не является постоянной величиной, то выражение (29) примет вид:

$$K = 2(p_{cp} + \Delta p)\pi R. \quad (30)$$

С другой стороны, силу действия газового буферного слоя на тело F_{np} можно записать следующим образом [2]:

$$F_{np} = \rho Q^2 / \eta S_{omk} \quad (31)$$

или

$$F_{np} = \frac{\rho Q_{cp}^2 (1 + \sin(\omega nt))^2}{\eta S_{cp} (1 + \sin(\omega nt))} = \frac{\rho Q_{cp}^2}{\eta S_{cp}} + \frac{\rho Q_{cp}^2}{\eta S_{cp}} \sin(\omega nt) \quad (32)$$

Преобразовав (31) с учетом (30) и (32), получим:

$$\Delta p \pi R z = \frac{\rho Q_{cp}^2}{\eta S_{cp}} \sin(\omega nt). \quad (33)$$

Тогда уравнение движения диска по вертикали при дискретном режиме подачи газа в газовый буферный слой выглядит следующим образом:

$$m\ddot{z} + 2\mu\pi R\dot{z} + 2p\pi R z = \frac{\rho Q_{cp}^2 \sin(\omega nt)}{\eta S_{cp}}. \quad (34)$$

Полученное дифференциальное уравнение представляет собой уравнение вынужденных колебаний легкодеформируемого объекта на дискретно запитываемом газовом буферном слое под действием периодической вынуждающей силы, решение которого можно представить в виде [3]:

$$z = z_1 + z_2, \quad (35)$$

где z_1 – общее решение уравнения (34) без учета правой части:

$$z_1 = A_1 e^{-\beta t} \sin(\omega nt). \quad (36)$$

MECHANICS

$$\beta = \frac{\mu\pi R}{m}. \quad (37)$$

$$\omega_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{p\pi R}{m} - \left(\frac{\mu\pi R}{m}\right)^2}. \quad (38)$$

где z_2 – частное решение полного уравнения (34):

$$z_2 = A_6 \sin(\omega_6 t - \psi) \quad (39)$$

Величину сдвига фазы можно определить из выражения:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\left(\frac{\mu\pi R}{m}\right)^2 \omega_6}{\frac{p\pi R}{m} - \omega_6^2}. \quad (40)$$

$$A_6 = \frac{\rho Q_{\text{ср}}^2}{m \eta S_{\text{ср}} \sqrt{\left(\frac{p\pi R}{m} - \omega_6^2\right)^2 + 4\left(\frac{\mu\pi R}{m}\right)^2 \omega_6^2}} \quad (41)$$

Тогда окончательно решение уравнения (34):

$$z_0 = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega_n t) + A_6 \sin(\omega_6 t + \psi). \quad (40)$$

Начальная амплитуда определяется по формуле:

$$A_0 = \frac{F_0}{m\omega_0^2} = \frac{\rho Q_{\text{ср}}}{\eta_i S_{\text{ср}} \rho \pi R}, \quad (43)$$

где:

$$\omega_0^2 = \frac{p\pi R}{m};$$

$$F_0 = \frac{\rho Q_{\text{ср}}}{\eta S_{\text{ср}}}.$$

Выражение для определения величины толщины газового буферного слоя запишем следующим образом:

$$h = h_0 + z_0. \quad (44)$$

Подставляя (44) и (23) в (22), получим выражение, характеризующее распределение давления в газовом буферном слое в зависимости от радиуса и времени:

$$\begin{aligned} p(r,t) = & C_1 e^{\frac{\rho a C_1 X \ln(x)}{2} - \frac{31h^4 \rho a^9 C_1^2}{5 Pa x}} \times \\ & \times \left(\int \left[\frac{\mu C_1}{x} e^{-\frac{\rho a C_1 X \ln(x)}{2} + \frac{31h^4 \rho a^9 C_1^2}{5 Pa x}} dx + C_2 \right] + \right. \\ & \left. + C_1 e^{-\int \left[\frac{h^4 \rho a C_1^2}{10 Pa x^2} + \frac{\rho a C_1 X}{Pa 2x} \right] dx} \times \right. \\ & \left. \times \left(\int \left[\frac{1}{h^2 C_1} \left(P_1(x) \left(\frac{3h^3 \rho a C_1^2}{10 Pa x^2} + \frac{\rho a C_1 X}{Pa 2x} \right) + \frac{2\mu}{x} \frac{\partial C_1}{\partial t} \right) \times \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \times e^{\int \left[\frac{h^4 \rho a C_1^2}{10 Pa x^2} + \frac{\rho a C_1 X}{Pa 2x} \right] dx} \right] dx + C_3 \right) \end{aligned} \quad (45)$$

где

$$X = \frac{3Q_0 \cos(\omega_n t) \omega_n}{\pi};$$

$$Y = -\frac{3}{\pi} Q_0 \sin(\omega_n t) \omega_n^2;$$

MECHANICS

$$C_1 = \frac{3(Q_{cp} + Q_{cp} \sin(\omega, t))}{\pi h^2};$$

$$C_2 = \frac{p_a}{e^{\frac{\rho_a C_1}{p_a} \frac{\partial(h^2 C_1)}{\partial t} \ln(3R^2) - \frac{3lh^4 \rho_a}{5 p_a} \frac{9C_1^2}{3R^2}}} + \left(\frac{3r^2}{3r_0^2} \int \frac{\mu C_1}{x} e^{\left(\frac{\rho_a C_1}{p_a} \frac{\partial(h^2 C_1)}{\partial t} \ln(x) + \frac{3lh^4 \rho_a}{5 p_a} \frac{9C_1^2}{x} \right)} dx \right);$$

$$C_3 = \frac{p_a}{e^{\left(\frac{h^4 \rho_a C_1^2}{10 p_a x^2} + \frac{\rho_a}{p_a 2x} \frac{\partial(h^2 C_1)}{\partial t} \right) dx}} + \left(\frac{3r^2}{3r_0^2} \int \frac{1}{h^2 C_1} \left(P_1(x) \left(\frac{3h^3 \rho_a C_1^2}{10 p_a x^2} + \frac{\rho_a}{p_a 2x} \frac{\partial^2(h^2 C_1)}{\partial t^2} \right) + \frac{2\mu}{x} \frac{\partial C_1}{\partial t} \right) \times e^{\left(\frac{h^4 \rho_a C_1^2}{10 p_a x^2} + \frac{\rho_a}{p_a 2x} \frac{\partial(h^2 C_1)}{\partial t} \right) dx} \right) dx.$$

Данное выражение можно решить любым из приближенных методов и может быть использовано как основа для получения упрощенной формулы инженерного расчета.

References:

- [1]. Abramov, G.V. Upravlenie mikromexanicheskimi protsessami v gidrodinamicheskikh sloyax pri proizvodstve poluprovodnikovix priborov / G. V. Abramov; Voronej. gos texnol. akad. Voronej, 2001. - 213 s.
- [2]. Bityukov, V.K. Pnevmaticheskie konveyeri / V. K. Bityukov, V. N. Kolodejnov, B. I. Кушев. - Voronej: Izd. - VGU, 1984. - 164 s.
- [3]. Elfimov, S.A. Struynie zaxvatnie ustroystva adaptivnix promishlennix robotov / S. A. Yelfimov. – Avtoref. dis. kand. texn. nauk: – Voronej: VGTA, 1999.
- [4]. Kolodejnov, V.N. Ob odnom podxode k resheniyu zadach gidrodinamiki v tonkix nesushix prosloykax / V.N. Kolodejnov // Прикладные задачи механики сплошнх сред. Voronej: izd-vo VGU. 1988. S. 85 – 89.
- [5]. Konstantinesku, V.N. Gazovaya smazka / V. N. Konstantinesku. - M.: Mashinostroenie, 1968. 720 s.
- [6]. Loytsyanskiy L.G. Mexanika jidkosti i gazov [Tekst] / L. G. Loytsyanskiy. - Ucheb.dlya vuzov. – Izd. 6-e, pererab. i dop. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987.- 840s.
- [7]. Nosov, O.A. K raschetu gidrodinamicheskogo koeffitsienta soprotivleniya pri padenii jestkoy sferivo vstrechnom potoke / O.A. Nosov, Ye.V. Nosova, Ye.D. Chertov, D.S. Шербakov // Modernizatsiya sushestvuyushhego i razrabotka ividov oborudovaniya dlya pishevoy promishlennosti. Sb. nauch. trudov. Vipusk 12 – Voronej: VGTA, 2002 g., S. 36 - 39.
- [8]. Nosov, O.A. Effekt pnevmozaxvata v nesushhey gazovoy prosloyke / O.A. Nosov, Ye.D. Chertov, D.S. Sherbakov // Tez. dok. XL otchetnoy nauchnoy konferentsii. CH.2 – Voronej: VGTA, 2002 g., S. 42 – 44.
- [9]. Chertov, Ye.D. Primenenie metodov mnogokriterialnoy kvadrachnoy optimizatsii vzaimodeystviya vozdushnoy strui s opornoj poverxnostyu vyazko-uprugoplastichnogo tela / Ye.D. Chertov, O.A. Nosov, M.A. Vasechkin // Materiali III Vserossiyskoy nauchno-texnicheskoy konferentsii. – Voronej: VGTA, 1999 g., S. 43 - 45.
- [10]. Sherbakov, D.S. Matematicheskoe modelirovanie sistemi “Ploskiy disk – nesushaya prosloyka – tsilindricheskoe soplo – ploskaya zaslonka” / D.S. Sherbakov, O.A. Nosov, S.O. Klimova // Materiali III-y Vserossiyskoy nauchno-texnicheskoy konferentsii “Teoriya konflikta i yee prilozheniya” – Voronej. Izd-vo “Nauchnaya kniga”, 2004. S 464-468.
- [11]. Sherbakov, D.S. Ob opredelenii ploshadi prohodnogo secheniya tsilindricheskogo sopla v sisteme “Krugloe otverstie protochnoy sistemi – ploskaya zaslonka” statisticheskimi metodami / D.S. Sherbakov, O.A. Nosov, M.Yu. Pavlovskiy // Materiali III-y Vserossiyskoy nauchno-texnicheskoy konferentsii “Teoriya konflikta i yee prilozheniya” – Voronej. Izd-vo “Nauchnaya kniga”, 2004. S 462-464

MECHANICS

Список литературы

- [1]. Абрамов, Г.В. Управление микромеханическими процессами в гидродинамических слоях при производстве полупроводниковых приборов / Г. В. Абрамов, Воронеж. гос технол. акад. Воронеж, 2001. - 213 с.
- [2]. Битюков, В.К. Пневматические конвейеры / В. К. Битюков, В. Н. Колодежнов, Б. И. Куцев. - Воронеж: Изд. - ВГУ, 1984. - 164 с.
- [3]. Елфимов, С.А. Струйные захватные устройства адаптивных промышленных роботов / С. А. Елфимов. – Автореф. дис. канд. техн. наук: – Воронеж: ВГТА, 1999.
- [4]. Колодежнов, В.Н. Об одном подходе к решению задач гидродинамики в тонких несущих прослойках / В.Н. Колодежнов // Прикладные задачи механики сплошных сред. Воронеж: изд-во ВГУ. 1988. С. 85 – 89.
- [5]. Константинуеску, В.Н. Газовая смазка / В. Н. Константинуеску. - М.: Машиностроение, 1968. 720 с.
- [6]. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газов [Текст] / Л. Г. Лойцянский. - Учеб.для вузов. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.- 840с.
- [7]. Носов, О.А. К расчету гидродинамического коэффициента сопротивления при падении жесткой сферы во встречном потоке / О.А. Носов, Е.В. Носова, Е.Д. Чертов, Д.С. Щербаков // Модернизация существующего и разработка новых видов оборудования для пищевой промышленности. Сб. науч. трудов. Выпуск 12 – Воронеж: ВГТА, 2002 г., С. 36 - 39.
- [8]. Носов, О.А. Эффект пневмозахвата в несущей газовой прослойке / О.А. Носов, Е.Д. Чертов, Д.С. Щербаков // Тез. док. XI отчетной научной конференции. Ч.2 – Воронеж: ВГТА, 2002 г., С. 42 – 44.
- [9]. Чертов, Е.Д. Применение методов многокритериальной квадратичной оптимизации взаимодействия воздушной струи с опорной поверхностью вязко-упруго-пластичного тела / Е.Д. Чертов, О.А. Носов, М.А. Васечкин // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. – Воронеж: ВГТА, 1999 г., С. 43 - 45.
- [10]. Щербаков, Д.С. Математическое моделирование системы “Плоский диск – несущая прослойка – цилиндрическое сопло – плоская заслонка” / Д.С. Щербаков, О.А. Носов, С.О. Климова // Материалы III-й Всероссийской научно-технической конференции “Теория конфликта и ее приложения” – Воронеж. Изд-во “Научная книга”, 2004. С 464-468.
- [11]. Щербаков, Д.С. Об определении площади проходного сечения цилиндрического сопла в системе “Круглое отверстие проточной системы – плоская заслонка” статистическими методами / Д.С. Щербаков, О.А. Носов, М.Ю. Павловский // Материалы III-й Всероссийской научно-технической конференции “Теория конфликта и ее приложения” – Воронеж. Изд-во “Научная книга”, 2004. С 462-464.