

4. Способ осреднения и оценка неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания ГТД / Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е., Диденко А.А., Абрашкин В.Ю.
5. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД -М.: Мир, 1986. -586с.
6. Меллор А.М. Загрязнение атмосферы газотурбинными двигателями. В кн.: Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. / Под ред. А.Н. Чигир. -М.: Машиностроение, 1981.-С.217-260.

УДК 621.5.041; 621.51

ГИДРОДИНАМИКА КРУГОВОЙ КОНИЧЕСКОЙ ЩЕЛИ СО СКЛАДЫВАЮЩИМИСЯ СТЕНКАМИ

Докторов О.Ю., Довгялло А.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Предлагаемая к решению задача касается гидродотерь в секциях складывающегося мембранного сальфона и продолжает проблему разработки методики расчета и проектирования сальфонного микрокомпрессора с гидроприводом (результаты некоторых исследований представлены авторами в другой статье настоящего сборника).

Как следует из анализа численных значений скорости в секции W , и чисел Re , которые в среднем не превышают единицы (для частот до 600 1/мин), рассматриваемое течение относится к классу "ползущих", $Re \leq 1$. Поиск моделей складывающихся стенок межмембранной щели не позволил выявить готового решения, поэтому для анализа была выбрана наиболее близкая задача "...течения вязкой несжимаемой жидкости в щелевых каналах в широком диапазоне чисел Рейнольдса" [1].

В нашем случае складывание стенок по воздействию на поток жидкости аналогично двумерному течению несжимаемой вязкой жидкости в плоском канале между двумя проницаемыми (пористыми) пластинами, через которые осуществляется симметричный отсос или вдув.

В указанной работе [1] фактически удалось получить точное решение уравнений Навье-Стокса при вдувах и отсосах любой интенсивности. Отличие решенной задачи от случая межмембранной щели состоит в том, что канал рассматривается плоским и проницаемость пластин по поверхности однородна, т.е. поперечная составляющая скорости (скорость вдува) не зависит от продольной координаты.

В случае сиффона щель круговая коническая, кроме того условие проницаемости пластин в точности не соблюдается. Однако при более внимательном рассмотрении течения во внешней полости сиффона отмечается почти линейное распределение радиальной скорости W по направлению движения, что позволяет пренебречь этим несоответствием. Нестационарность процесса, характерную для сиффона, можно заменить условием квазистационарности для рассматриваемой временной точки, а форму канала принять плоской.

В этом случае стационарное ламинарное течение несжимаемой жидкости в плоском канале между параллельными пластинами описывается уравнениями Навье-Стокса

$$W \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{U}{\delta} \cdot \frac{\partial W}{\partial \xi} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{1}{\delta^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} \right); \quad (1)$$

$$W \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U}{\delta} \cdot \frac{\partial U}{\partial \xi} = -\frac{1}{\delta \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{\delta^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} \right) \quad (2)$$

и уравнением неразрывности

$$\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\partial U}{\partial \xi} = 0. \quad (3)$$

Здесь $\xi = z/\delta$ - безразмерная координата. Составляющие скорости W и U соответствуют положительным направлениям осей x и z , 2δ - высота канала (рис. 1).

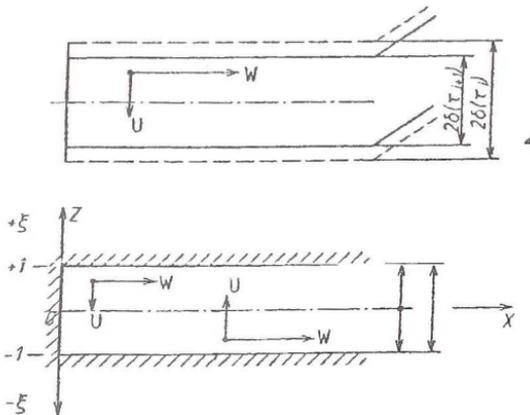


Рис. 1. Схема щели со складывающимися стенками

Граничные условия будут иметь вид:

$$\begin{aligned} W(x, -l) &= 0; \\ U(x, -l) &= -U_c; \\ W(x, l) &= 0; \\ U(x, l) &= U_c; \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь U_c - скорость перемещения стенки, при отсосе (растяжение сиффона) $U_c < 0$, при вдуве (скапливание сиффона) $U_c > 0$.

Решение этой задачи по / 1 / дает выражение для падения давления вдоль канала:

$$P(0, \xi) - P(x, \xi) = -\frac{k \cdot \rho \cdot v}{\delta^2} \cdot \left(W_0 \cdot x - \frac{U_c \cdot x^2}{2 \cdot \delta} \right); \quad (5)$$

коэффициент "k" - является константой

$$k = -\chi \cdot \left(3 - \frac{21}{35} \cdot Re \right). \quad (6)$$

В этих формулах:

W_0 - скорость на входе в канал,

χ - коэффициент неравномерности вдува одной стенки относительно другой,

$Re' = \frac{U_c \cdot \delta}{\nu}$ - число Рейнольдса, построенное по поперечной скорости

U_c .

Re_c является динамически значимым параметром для двумерных течений в узких областях и отражает их отличие от однонаправленных потоков, в которых ускорение равно нулю. Это обстоятельство, как покажет дальнейший анализ, в нашем случае имеет особое значение.

Более подробно проанализируем (5) и (6). Для течений с конечными значениями W и U , когда транзитное течение с компонентой $W_0 x$ в скобках выражения (5) является основным расходным потоком, т.е. $W \gg U$, становится очевидным, что с увеличением отсоса ($Re' > 0$) фронт нарастания продольной составляющей скорости W вблизи стенок канала становится более крутым и соответственно возрастает трение жидкости об эти стенки. Это видно по (6) уже при $Re' > 1.5$ (пусть $\chi = 1$) коэффициент k по абсолютной величине возрастает и ΔP увеличивается. При вдуве ($Re' < 0$) наблюдается противоположный эффект. Физически это объясняется как бы разжижением пристеночного слоя.

Отметим, что смена знака у k , и соответственно смена влияния "отсоса-вдува" на противоположное имеет место в районе значений $Re' \approx 1.5$ и соответствующих соотношениях скорости на входе в канал W_0 и скорости вдува U_c .

При складывании межмембранной щели, когда скорость на входе $W_0 = 0$, падение давления вдоль канала генерируется уже не транзитным потоком, который вовсе отсутствует, а самим поперечным потоком вдува-отсоса (в

нашем случае деформацией стенок), что принципиально меняет сущность воздействия U_c на поток и гидравлическое сопротивление.

Оценим потери давления в секции для двух фаз: складывание и растяжение сиффона.

В случае сжатия скорость на входе в канал (при $x = 0$) $W_0 = 0$. U_c рассматриваем как постоянную величину, равную среднему по длине щели значению в диапазоне от нуля (при $x = 0$) до U_n (при $x \rightarrow \frac{D_H - D_B}{2}$). Высота канала для схемы секции сиффона (рис.2) будет равна среднему текущему

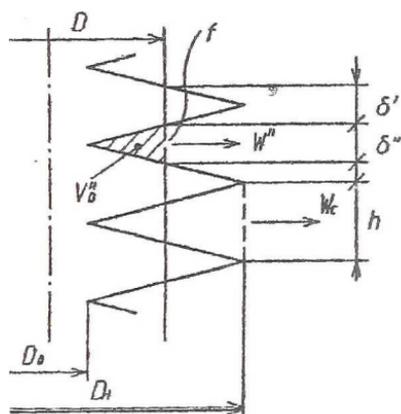


Рис.2. Расчетная схема сиффона

значению зазора $\bar{\delta} = \frac{h}{2}$. Длину канала при $x \rightarrow \frac{D_H - D_B}{2}$ обозначим l .

Тогда для фазы сжатия (5) запишется следующим образом:

$$\Delta P = - \left(3 + \frac{81}{35} \cdot \frac{U_c \cdot \delta}{2 \cdot v} \right) \cdot \frac{4 \cdot \rho \cdot v \cdot U_c \cdot x^2}{\delta^3} \quad (7)$$

$$k = \left(3 + \frac{81}{35} \cdot \frac{U_c \cdot \delta}{2 \cdot v} \right), \quad \text{здесь } U_c < 0, \\ x < 0, Re' < 0. \quad (8)$$

В случае растяжения скорость

на входе в канал соответствует скорости на входе в секцию $W_0 = W_c$.

$$\Delta P = - \left(3 - \frac{81}{35} \cdot \frac{U_c \cdot \delta}{2 \cdot v} \right) \cdot \frac{\rho \cdot v}{\delta^3} \cdot \left(W_0 \cdot l - \frac{U_c \cdot l^2}{2 \cdot \delta} \right); \quad (9)$$

$$k = \left(3 - \frac{81}{35} \cdot \frac{U_c \cdot \delta}{2 \cdot v} \right), \quad \text{здесь } U_c > 0, x > 0, Re' > 0. \quad (10)$$

Поперечную составляющую U_c определим как условную среднерасходную скорость "фильтрации" через поверхность мембраны

$$U_c = \frac{\Delta V}{2 \cdot F_M \cdot \Delta \tau}$$

где ΔV - элементарное изменение объема секции за время $\Delta \tau$; F_M - площадь поверхности мембраны сиффона:

$$F_M = \frac{\pi \cdot (D_H^2 - D_B^2)}{4} = \frac{\pi \cdot D_H^2}{4} \cdot (1 - \alpha^2).$$

Длина щели по координате x (радиусу):

$$l = \frac{D_H - D_B}{2} = \frac{D_H}{2} \cdot (1 - \alpha).$$

Учитывая, что расход из секции $\frac{\Delta V}{\Delta \tau}$ можно определить по выходной скорости W_C ,

$$\Delta V = W_C \cdot \pi \cdot D_H \cdot h \cdot \Delta \tau$$

найдем U_C следующим образом:

$$U_C = \frac{\Delta V}{2 \cdot F_M} = \frac{2 \cdot h \cdot W_C}{D_H \cdot (1 - \alpha^2)}.$$

Дальнейшие преобразования будем делать, используя выходные параметры h и W_C

Тогда для фазы сжатия

$$\Delta P_1 = \left(3 + \frac{8l}{35} \cdot \frac{U_c \cdot h}{4 \cdot v} \right) \cdot \frac{32 \cdot \rho \cdot v \cdot U_c \cdot l^2}{h^3}; \quad (11)$$

для фазы растяжения

$$\Delta P_2 = \left(3 - \frac{8l}{35} \cdot \frac{U_c \cdot \delta}{2 \cdot v} \right) \cdot \frac{\rho \cdot v}{\delta^3} \cdot \left(-W_0 \cdot l - \frac{U_c \cdot l^2 \cdot 2}{h} \right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot v \cdot 16}{h^2} \right). \quad (12)$$

Если в формулы ввести отношение диаметров α , длину щели l , число Рейнольдса по выходной скорости из секции Re_C , то потери давления в щели можно представить в виде следующих выражений.

Для фазы сжатия:

$$\Delta P_1 = k \cdot \rho \cdot \frac{W_C^2}{2} \cdot \frac{l}{h} \cdot \frac{64}{Re_C \cdot (1 + \alpha)}; \quad (13)$$

для фазы растяжения:

$$\Delta P_2 = k \cdot \rho \cdot \frac{W_C^2}{2} \cdot \frac{l}{h} \cdot \frac{(3 + \alpha)32}{Re_C \cdot (1 + \alpha)}. \quad (14)$$

Так как длина щели l связана с характерным размером сиффона D_H через α :

$$l = \frac{D_H}{2} \cdot (1 - \alpha),$$

то в последнее выражение можно подставить D_H , после чего:

$$\Delta P_1 = k \cdot \frac{D_H}{2} \cdot (1 - \alpha) \cdot \rho \cdot \frac{W_C^2}{2 \cdot h} \cdot \frac{64}{Re_C \cdot (1 + \alpha)} = \frac{A_1}{Re_C} \cdot \rho \cdot \frac{W_C^2}{2} \cdot \frac{D_H}{h}; \quad (15)$$

$$\Delta P_2 = k \cdot \frac{D_H}{2} \cdot (1 - \alpha) \cdot \rho \cdot \frac{W_C^2}{2 \cdot h} \cdot \frac{32 \cdot (3 + \alpha)}{Re_C \cdot (1 + \alpha)} = \frac{A_2}{Re_C} \cdot \rho \cdot \frac{W_C^2}{2} \cdot \frac{D_H}{h}; \quad (16)$$

Такая структура формулы является общепринятой в гидродинамике, при этом комплекс $\frac{A}{Re}$ есть коэффициент трения, а его произведение на отношение $\frac{D_H}{h}$ будет аналогом коэффициента сопротивления, т.е.

$$\xi = \lambda \cdot \frac{l}{d} = \frac{A}{Re_C} \cdot \frac{D_H}{h};$$

$$A_1 = \frac{k \cdot 32 \cdot (1 - \alpha)}{1 + \alpha};$$

$$A_2 = \frac{k \cdot 16 \cdot (1 - \alpha) \cdot (3 + \alpha)}{1 + \alpha}.$$

Оценим численные значения коэффициентов A_1 и A_2 для фаз сжатия и растяжения сиффона. Как следует из предварительных расчетов значение числа Re_C не превышает единицы, другие, входящие величины будут соответственно для рассматриваемых типоразмеров сиффонов следующими

$$\alpha = 0.5 \dots 0.6; \quad \frac{h}{D_H} = 0.02 \dots 0.04; \quad 0 < Re_C < 1.$$

Тогда:

$$A_1 = \frac{96 \cdot (1 - \alpha)}{(1 + \alpha)} \cdot \left(1 + \frac{27}{35} \cdot Re_C \cdot \frac{h}{D_H} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 - \alpha^2)} \right); \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{48 \cdot (3 + \alpha) \cdot (1 - \alpha)}{(1 + \alpha)} \cdot \left(1 - \frac{27}{35} \cdot Re_C \cdot \frac{h}{D_H} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 - \alpha^2)} \right); \quad (18)$$

При этих условиях численное значение второго слагаемого в скобках (17) и (18) становится несоизмеримо мало по сравнению с единицей, в связи с чем им можно пренебречь.

Исходя из выведенных соотношений коэффициенты трения $\lambda = \frac{A}{Re_c}$

для фазы сжатия и растяжения сальфона в сходственные моменты времени (при равных значениях скоростей на выходе (входе) сальфона) и, соответственно, текущие перепады давления ΔP в секции сальфона будут соотносится между собой как

$$\frac{\Delta P_{расст}}{\Delta P_{сж}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{16 \cdot (3 + \alpha)}{32} = \frac{3 + \alpha}{2}, \quad (19)$$

для $\alpha = 0.6$ в фазе растяжения гидропотери будут превышать таковые для фазы сжатия в 1.8 раза, что и отмечается в эксперименте (рис.3)

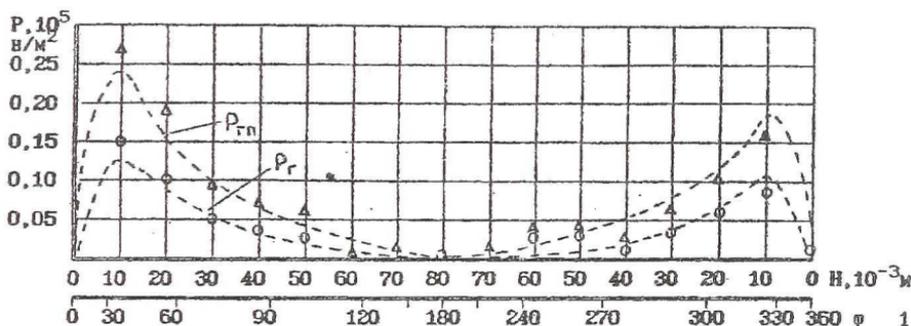


Рис.3. Гидравлические потери в секциях $P_{ГП}$ по фазам деформации сальфона: (пунктир – расчетные зависимости, сальфон 70×40 мм, ход 80 мм, $n = 377$ 1/мин, масло ВМ-4)

Интересным является тот факт, что при введении в формулу (15) для $A=24$ средних параметров щели, и скорости, т.е.:

$$\bar{W} = \frac{W_c}{2}; \quad \bar{\delta} = \frac{h}{2}; \quad \bar{Re} = \frac{Re_c}{2}; \quad l = \frac{D_H}{2} \cdot (1 - \alpha).$$

Формула (15) приобретает следующий вид:

$$\Delta P = \frac{96}{Re} \cdot \rho \cdot \frac{\bar{W}^2}{2} \cdot \frac{l}{d_r},$$

где $d_r = 2\bar{\delta}$

Последняя формула соответствует известным соотношениям [2]. Она получена путем введения осредненных параметров щели и потока специально для выявления коэффициента A .

Это подтверждает и вывод, полученный из решения задачи, представленной в работе [1]. Так, если $Re' \rightarrow 0$ и $\chi = 1$, то решение (5) принимает вид формулы для Пуазейлевского течения в плоском канале, при этом решение соответствует результатам [3] для течения в плоском канале с пористыми стенками при симметричных вдувах и отсосах малой интенсивности.

Приведенные результаты дают возможность сопоставить физическую модель и процессы в секции сиффона и полученное ранее решение (5).

В принципе, постановка задачи и ее решение (5) и (6) “не знают” природы “вдува-отсоса”, и при анализе ΔP по (5) эти потери относятся к основному транзитному потоку, расход которого причинно не зависит от расхода поперечного потока.

В представленном здесь случае W и U , а также Re и Re' причинно и функционально взаимосвязаны через геометрию сиффона, а расход в секциях обеспечивается деформацией стенок, т.е. поперечной составляющей U_c .

Это обстоятельство не позволяет рассматривать отдельно влияние, например, U_c на ΔP при произвольно заданном W_c . поэтому полученные соотношения (15) и (16) для заданного типоразмера сиффона и особенностей его привода являются однозначными функциями расходной скорости W_c , которая в свою очередь зависит от частоты складывания.

Представленные результаты и их анализ позволяют заключить следующее:

- полученные соотношения с достаточной точностью позволяют рассчитать гидросопротивление в межмембранной щели сиффона при его работе в гидравлической камере большого объема;
- методика дает возможность получить временную картину потерь давления и изучить динамику процесса;
- уровень гидросопротивления в фазе растяжения сиффона больше такового при его складывании, что подтверждает аналогию с вдувом и отсосом в каналах с проницаемыми стенками;
- для практических расчетов при малых частотах складывания сиффона можно пренебречь асимметрией ΔP в фазах деформации и для определения текущих гидропотерь использовать формулу

$$\Delta P = \frac{24}{Re_c} \cdot \rho \cdot \frac{W_c^2}{2} \cdot \frac{D_H}{h}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков П.А., Любин Л.Я. Гидромеханика шелевых систем.—Минск: Наука и техника, 1988.—344с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям./ Под ред. М.О. Штейнберга.—М.: Машиностроение, 1992.—672с.
3. Вегман А.С.// J. Appl. Phys. 1953, v.24, p 1232-1235.

УДК 621.5.041; 621.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КАМЕРЕ ГИДРОПРИВОДА СИЛЬФОННОГО МИКРОКОМПРЕССОРА

Докторов О.Ю., Довгялло А.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Среди мембранных и поршневых компрессоров сухого трения с чистыми, герметичными рабочими полостями сильфонный компрессор имеет свои преимущества. Однако его особенностью по сравнению с мембранным является значительный объем прокачиваемой в гидроприводе жидкости.

Энергетические затраты в гидроприводе сильфона будут определяться потерями давления в гидравлической камере, потерями на трение в плунжере, клапанах, фильтрах и других элементах.

Внешняя полость сильфона образована условной боковой поверхностью внешнего диаметра и коническими межмембранными круговыми щелями. Для удобства расчета можно принять плоско-коническую форму мембран, тогда расчетная схема сильфона будет соответствовать представленной на рис. 1.

Решение задачи определения параметров потока снаружи сильфона для несжимаемой жидкости будет следующим.

Объем части секции, ограниченный текущим диаметром D , определится как разность объема цилиндра

$$V_D = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \delta^n$$

и части внутреннего объема секции сильфона

$$V'_D = \frac{\pi}{12} \cdot (D^2 + D \cdot D_B + D_B^2) \cdot \delta^n, \quad (1)$$