

ЭФФЕКТ ОБРАЗОВАНИЯ НАПРАВЛЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В ТОНКИХ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЗАЗОРАХ С ВИБРАЦИЕЙ

С.Г. Некрасов, Н.А. Пашнина

Рассмотрены интегральные характеристики вибронесущего плоского и цилиндрического слоя газа с профилированными ограничивающими поверхностями. Генерация поля давлений и создание направленного движения среды основано на нелинейном взаимодействии вибрации и газа в профилированном зазоре. Анализируется работа комбинированного слоя в виде последовательного соединения плоского и цилиндрических слоев. Представлен асимптотический анализ и параметрическое исследование плоского и цилиндрического слоев с вибрацией. Выявлено положительное влияние профилирования, обеспечивающее многократное увеличение расхода при профилировании плоского и цилиндрического зазоров.

Введение. В большинстве работ по теории газовой смазки вибронесущие газовые слои рассматривались как средство для создания газовых опор скольжения, поэтому профилированию рабочих поверхностей слоя не придавалось практического значения и оно считалось вредным. В данной работе профилирование используется для получения иного эффекта - создания расхода газа (компрессорное действие слоя) с величиной достаточной для использования в ряде технических устройств. Этот эффект является следствием относительно высокого градиента давления в направлении одной из обобщенных координат профилированного зазора даже при равномерной вибрации, т.е. определяется «генераторными» свойствами тонкого газового слоя [1].

Рассматриваемый эффект уже используется в компрессорных устройствах, которые имеют такие положительные свойства как высокая разрешающая способность подачи газа (до 10^{-9} литра за один такт работы); отсутствие загрязнения рабочей среды; функционирование в агрессивных средах, низких и высоких температурах; возможность работы через толстую стенку. Такие слои могут использоваться для транспортировки и дозирования жидкостей и газов.

Недостатком является сравнительно небольшая величина расхода, обусловленная естественно малой величиной зазора и амплитудой колебаний опорных поверхностей. В этой связи актуальной является задача исследования и оптимизации работы профилированного вибронесущего слоя с целью повышения его производительности, расширения диапазона задаваемого расхода, как в сторону увеличения, так и уменьшения.

Ряд выводов об оптимальности в вышеупомянутом смысле можно сделать на основе асимптотического анализа вибронесущего слоя [2], однако достаточно полное решение поставленной задачи можно получить численно, что позволяет определить, например, влияние частоты вибрации [3] на его производительность.

Математические модели профилированных слоев. Функция зазора профилированного плоского осесимметричного слоя сформирована в виде (1), а цилиндрического слоя (здесь представлен его частный случай - капилляр) в виде (2):

$$h_1 = \delta^* \cdot \cos\left(\frac{\tilde{r} - d/2}{D/2 - d/2} \cdot \frac{\pi}{2}\right)^n + z^* + \left[(H_{1v} - H_{2v}) \cdot \cos\left(\frac{\tilde{r} - d/2}{D/2 - d/2} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + H_{2v} \right] \cdot \cos(\tau), \quad (1)$$

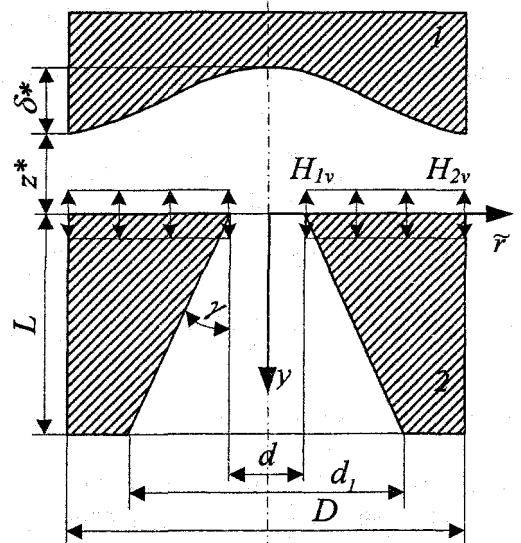


Рис. 1. Схема профилированных плоского и цилиндрического слоев с вибрацией

$$h_2 = \frac{d}{2} + k_p^* \cdot y + k_h \cdot H_v \cdot \cos(\tau), \quad (2)$$

где \bar{r} - радиальная координата; δ^* и z^* - глубина профиля и номинальный зазор плоского слоя ($\delta^* < z^*$); D и d - внешний и внутренний диаметр (рис. 1) плоского слоя; H_{1v} - амплитуда колебаний в центре плоской опорной поверхности при $\bar{r} = d/2$ ($H_{1v} < z^*$); H_{2v} - амплитуда колебаний на периферии опорной поверхности при $\bar{r} = D/2$ ($H_{2v} < z^*$); $\tau = vt$ - безразмерное время; v - частота колебаний активных поверхностей плоского и цилиндрического слоев; t - время; n - крутизна профиля; $k_p^* = \operatorname{tg}(\gamma) = \frac{d_1 - d}{2 \cdot L}$ и y - коэффициент конусности и осевая координата цилиндрического слоя ($0 \leq y \leq L$), причем $k_p^* \cdot L < d/4$; k_h - безразмерный коэффициент, близкий к коэффициенту Пуассона материала и определяющий соотношение амплитуд колебаний в осевом и радиальном направлениях, причем имеет место условие $k_h \cdot H_{1v} < d/2$. Вышеуказанные ограничения (неравенства) определяют величину амплитуды колебаний и максимальную глубину профиля меньше номинальных зазоров z^* и $d/2$ для плоского и цилиндрического слоев соответственно.

Функция зазора (1) содержит осесимметричный профиль, изменяемый по косинусоидальному закону с показателем степени (крутизна профиля) n ($0 < n < \infty$), что позволяет получить при различных степенях n практически любой осесимметричный профиль - от линейного до ступенчатого. Предполагается неравномерность распределения амплитуд колебаний по радиусу, что отражается третьим слагаемым в выражении (1). В функции (2) коэффициент k_p^* характеризует величину «конусности» цилиндрического капилляра, возникающую обычно как погрешность при его изготовлении.

Введем в рассмотрение следующие безразмерные величины: $r = 2 \cdot \bar{r} / D$ - безразмерный радиус ($k \leq r \leq 1$); $k = d/D$; $h_{1v} = H_{1v} / (\delta^* + z^*)$; $h_{2v} = H_{2v} / (\delta^* + z^*)$; $h_v = 2 \cdot k_h \cdot H_v / d$; $w = 2 \cdot y / D$ - безразмерная осевая координата ($0 \leq w \leq B$); $B = 2 \cdot L / D$ - безразмерная длина цилиндрического слоя; $\delta = \delta^* / (\delta^* + z^*)$ и $z = z^* / (\delta^* + z^*)$ - безразмерные глубина профиля и номинальный зазор; $k_p = k_p^* \cdot \frac{D}{d}$ - безразмерный коэффициент конусности. Тогда функции (1) и (2) в безразмерном виде запишем следующим образом:

$$H_1 = \delta \cdot \cos\left(\frac{r-k}{1-k} \cdot \frac{\pi}{2}\right)^n + z + \left[(h_{1v} - h_{2v}) \cdot \cos\left(\frac{r-k}{1-k} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + h_{2v} \right] \cdot \cos(\tau) = H_{01} + A_v \cdot \cos(\tau), \quad (3)$$

$$H_2 = 1 + k_p \cdot w + h_v \cdot \cos(\tau) = H_{02} + h_v \cdot \cos(\tau), \quad (4)$$

где $H_{01} = \delta \cdot \cos\left(\frac{r-k}{1-k} \cdot \frac{\pi}{2}\right)^n + z$ и $H_{02} = 1 + k_p \cdot w$ - независящие от времени части функций зазора плоского и цилиндрического слоев; $A_v = \left[(h_{1v} - h_{2v}) \cdot \cos\left(\frac{r-k}{1-k} \cdot \frac{\pi}{2}\right) + h_{2v} \right]$ - распределение амплитуды колебаний вибрирующей поверхности.

Сформируем асимптотические краевые задачи для распределения давлений в осесимметричном плоском и цилиндрическом слоях, используя стандартные для газовой смазки допущения [4]. Введем в рассмотрение вспомогательную функцию давления $\psi = P \cdot H$ и запишем асимптотические уравнения для определения функций $\psi_{\infty 1}$ - для плоского слоя и $\psi_{\infty 2}$ - для цилиндрического слоя [5], где P - мгновенное давление в слое, H - мгновенное значение функции зазора.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot \left(\frac{H_{01}}{2} \cdot \frac{\partial \psi_{\infty 1}^2}{\partial r} - \psi_{\infty 1}^2 \cdot \frac{\partial H_{01}}{\partial r} \right) \right] = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{H_{02}}{2} \cdot \frac{\partial \psi_{\infty 2}^2}{\partial w} - \psi_{\infty 2}^2 \cdot \frac{\partial H_{02}}{\partial w} \right) = 0. \quad (6)$$

Асимптотические краевые условия, справедливые в некоторой окрестности естественной границы области определения, ширина которой обратно пропорциональна частотному параметру задачи [2], имеют вид (7) в случае плоского зазора и вид (8) в случае капилляра:

$$\psi_{\infty 1}^2(r) = H_{01}^2(r) + 3/2 \cdot A_v^2(r), \text{ при } r=1; \quad \psi_{\infty 1}^2(r) = H_{01}^2(r) + 3/2 \cdot A_v^2(r), \text{ при } r=k; \quad (7)$$

$$\psi_{\infty 2}^2(w) = H_{02}^2(w) + 3/2 \cdot h_v^2, \text{ при } w=0; \quad \psi_{\infty 2}^2(w) = H_{02}^2(w) + 3/2 \cdot h_v^2, \text{ при } w=B. \quad (8)$$

Коэффициенты краевых задач (5), (7) и (6), (8) зависят от координат r и w , однако дивергентная форма уравнений (5) и (6) позволяет получить решение в аналитическом виде или свести решение к процедуре численного интегрирования аналитического выражения.

Рассмотрим ход решения уравнений (5) и (6). Проинтегрируем каждое из уравнений и запишем результирующие уравнения первого порядка в виде

$$\frac{\partial \psi_{\infty 1}^2}{\partial r} - \frac{2}{H_{01}} \cdot \frac{\partial H_{01}}{\partial r} \cdot \psi_{\infty 1}^2 = -\frac{c_1}{r} \cdot \frac{2}{H_{01}}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \psi_{\infty 2}^2}{\partial w} - \frac{2}{H_{02}} \cdot \frac{\partial H_{02}}{\partial w} \cdot \psi_{\infty 2}^2 = -c_3 \cdot \frac{2}{H_{02}}. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) представляют собой дифференциальные уравнения первого порядка с переменными коэффициентами, решение которых будем искать в виде [6]

$$\psi_{\infty 1}^2 = \frac{1}{E(r)} \cdot \left[(-2 \cdot c_1) \cdot \int \frac{E(r)}{r \cdot H_{01}} dr + c_2 \right] = \frac{1}{E(r)} \cdot [(-2 \cdot c_1) \cdot \text{Sym}(r) + c_2], \quad (11)$$

$$\psi_{\infty 2}^2 = \frac{1}{F(w)} \cdot \left[(-2 \cdot c_3) \cdot \int \frac{F(w)}{H_{02}} dw + c_4 \right] = H_{02}^2 \cdot \left[\frac{1}{H_{02}^2 \cdot k_p} \cdot c_3 + c_4 \right], \quad (12)$$

где $E(r) = e^{-2 \cdot \ln(H_{01})}$; $F(w) = e^{-2 \cdot \ln(H_{02})}$; $c_1 = \frac{3}{4} \cdot \frac{h_v^2}{\text{Sym}(r=1)} \cdot \frac{h_{2v}^2}{z^2}$, $c_2 = 1 + \frac{3/2 \cdot h_v^2}{(z + \delta)^2}$, $c_3 = 3/2 \cdot h_v^2 \cdot k_p$ и $c_4 = 1$

- постоянные интегрирования. Интегралы в выражениях (11) и (12) вычисляем, в общем случае, численно и при некоторых значениях n аналитически; $\text{Sym}(r)$ - функция приближенного вычисления интеграла в (11).

В соответствии с определением давление равно отношению Ψ/H . Отсюда можно найти средние за период колебаний избыточные давления в плоском (13) и цилиндрическом слоях (14):

$$P_1 = \frac{\psi_{\infty 1}}{\sqrt{(H_{01})^2 - (A_v)^2}} - 1, \quad (13)$$

$$P_2 = \frac{\psi_{\infty 2}}{\sqrt{(H_{02})^2 - h_v^2}} - 1. \quad (14)$$

Основными интегральными характеристиками являются несущая способность, расход и производительность, рассчитываемая здесь как произведение расхода на реализуемый слоями перепад давлений. Несущая способность плоского слоя определяется интегрированием среднего за период давления (13) по площади и в безразмерном виде равна

$$F_z = \frac{2}{1 - k^2} \cdot \int_k^1 P_1 \cdot r dr. \quad (15)$$

Массовый расход газа в каждом из рассматриваемых слоев через некоторое сечение $r = \text{const}$ или $w = \text{const}$ определяется скоростью течения среды в слоях и выражается через функцию распределения давлений. Впервые аналитическое исследование расхода в плоском вибронесущем слое с неравномерным распределением амплитуд колебаний на основе асимптотической теории было проведено Мартыновой Е.А. и, в дальнейшем, ей же, вместе с Биушкиным В.А., это исследование было подтверждено экспериментально [7].

Профилирование слоя вносит в выражение для расхода существенные особенности, на которых необходимо остановиться в силу специфики решаемой задачи. Выражение для мгновенного расхода в плоском осесимметричном слое равно

$$Q_{r1} = \int_0^h \int_0^{2\pi} V_r \cdot r \, dy \, d\theta, \quad (16)$$

где V_r - скорость частиц газа в радиальном направлении; y - координата по толщине плоского слоя, θ - окружная координата.

Из уравнения Рейнольдса интегрированием по толщине слоя определим скорость V_r , где постоянные интегрирования найдем, следуя гипотезе прилипания газа к границам зазора. Подставим выражение для скорости в формулу (16) и перейдем от объемного расхода к массовому, заменив плотность давлением из уравнения состояния при изотермическом термодинамическом процессе в слое. Тогда массовый расход газа в среднем за период колебаний с учетом введенных ранее безразмерных обозначений, примет следующий вид:

$$M_{r1} = -K_{p1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H_{01}^3 \cdot \frac{\partial P_1^2}{\partial r}, \quad (17)$$

где $K_{p1} = \frac{\rho_a \cdot P_a \cdot (\delta + z)^3}{24 \cdot \mu}$ - коэффициент расхода; μ - вязкость; P_a - давление окружающей среды; ρ_a - плотность воздуха при давлении P_a . Можно переписать выражение (17), используя вспомогательную функцию $\psi_{\infty 1}$, в следующем виде:

$$M_{r1} = -K_{p1} \cdot r \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left[H_{01} \cdot \frac{\partial \psi_{\infty 1}^2}{\partial r} - 2 \cdot \psi_{\infty 1}^2 \cdot \frac{\partial H_{01}}{\partial r} \right]. \quad (18)$$

Как видим, профилирование приводит к появлению второго слагаемого в скобках, которое отсутствует в выражениях расхода для непрофилированных слоев. С учетом монотонности функции $\psi_{\infty 1}$ очевидно, что определяющим будет влияние второго слагаемого, однако если эти слагаемые сравнимы, то величина расхода уменьшается или меняет направление (это наблюдалось в процессе экспериментов). Требование высокого расхода определяет большую величину градиента зазора, что в пределах малой величины зазора может привести к необоснованно малой площади опорных поверхностей и потере работоспособности из-за малой несущей способности слоя, если не предусмотрены ограничивающие зазор конструктивные элементы. Это же может привести к снижению величины частотного параметра задачи, что делает необоснованным полученные результаты, и определяет необходимость численного решения соответствующей нестационарной задачи.

Аналогично можно получить выражение для массового расхода цилиндрического слоя:

$$M_{r2} = -K_{p2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left[H_{02} \cdot \frac{\partial \psi_{\infty 2}^2}{\partial w} - 2 \cdot \psi_{\infty 2}^2 \cdot \frac{\partial H_{02}}{\partial w} \right]. \quad (19)$$

Модель комбинированного слоя. Задача последовательного соединения плоского и цилиндрического слоя является следствием задачи практической реализации компрессорных устройств, у которых нельзя организовать работу без надлежащей системы подвода и отвода жидкости или газа [8]. Один из таких вариантов реализации представлен на рис. 1.

Параметрическая оптимизация плоского слоя по максимуму расхода проведена в работе [9]. Был выявлен оптимальный вид профиля для плоского слоя и построены зависимости характеризующие влияние таких параметров как глубина профиля (δ^*), отношение внутреннего и наружного диаметров плоской поверхности $2(k)$; амплитуда колебаний (h_{2v}) и т.д. Проведем аналогичный анализ в данном случае.

Сопряжение математических моделей для плоского и цилиндрического слоев проведем из условия равенства в месте сопряжения ($r = k, w = 0$) давлений и расхода. На свободных краях ($r = 1$ и $w = B$) справедливы асимптотические краевые условия (7) и (8). В результате система краевых условий имеет вид

$$\begin{cases} \psi_{\infty 1}^2 = \psi_{\infty 1}^2(r=1), \\ \psi_{\infty 2}^2 = \psi_{\infty 2}^2(w=B), \\ M_{r1}(r=k) = M_{r2}(w=0), \\ P_1(r=k) = P_2(w=0). \end{cases} \quad (20)$$

Перепишем (20) с учетом (7), (8), (11), (12), (13), (14), (18) и (19) в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{E(r)} \cdot [(-2 \cdot c_1) \cdot \text{Sym}(r) + c_2] = H_{01}^2(r) + \frac{3}{2} \cdot A_v^2(r) /_{r=1}, \\ H_{02}^2(w) \cdot \left[\frac{c_3}{H_{02}^2(w) \cdot k_p} + c_4 \right] = H_{02}^2(w) + \frac{3}{2} \cdot h_v^2 /_{w=B}, \\ -K_{p2} \cdot c_3 = c_1 \cdot K_{p1}, \\ \frac{1}{E(r)} \cdot [(-2 \cdot c_1) \cdot \text{Sym}(r) + c_2] = \frac{H_{02}^2(w) \cdot \left[\frac{c_3}{H_{02}^2(w) \cdot k_p} + c_4 \right]}{\sqrt{(H_{01}(r))^2 - (A_v(r))^2}} = \frac{H_{02}^2(w) \cdot \left[\frac{c_3}{H_{02}^2(w) \cdot k_p} + c_4 \right]}{\sqrt{(H_{02}(w))^2 - h_v^2}} /_{r=k, w=0}. \end{cases} \quad (21)$$

Из системы уравнений (21) определяем постоянные интегрирования c_1, c_2, c_3 и c_4 :

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{-K_{p2} \cdot k_p \cdot (\text{Zapl}(r) \cdot Hz \cdot H_{02}^2(w) - \text{Zats}(w) \cdot Hp)}{\text{zna}(r, w)} /_{r=1, w=B}; \\ c_2 &= Hp \cdot \frac{\text{Zapl}(r) \cdot K_{p1} \cdot (H_{02}^2(w) - 1) + 2 \cdot \text{Zats}(w) \cdot \text{Sym}(r) \cdot K_{p2} \cdot k_p}{\text{zna}(r, w)} /_{r=1, w=B}; \\ c_3 &= \frac{K_{p1} \cdot k_p \cdot (\text{Zapl}(r) \cdot Hz \cdot H_{02}^2(w) - \text{Zats}(w) \cdot Hp)}{\text{zna}(r, w)} /_{r=1, w=B}; \\ c_4 &= \frac{\text{Zats}(w) \cdot (Hp \cdot K_{p1} + 2 \cdot K_{p2} \cdot k_p \cdot \text{Sym}(r) \cdot Hz) - \text{Zapl}(r) \cdot Hz \cdot K_{p1}}{\text{zna}(r, w)} /_{r=1, w=B}. \end{aligned}$$

$$\text{где } Hz = 1 - h_v^2; \quad \text{Zapl}(r) = \left[H_{01}^2(r) + \frac{3}{2} \cdot A_v^2(r) \right] \cdot \left(\frac{1}{z} \right)^2 /_{r=1}; \quad \text{Zats}(w) = \left[H_{02}^2(w) + \frac{3}{2} \cdot h_v^2 \right] /_{w=B}; \\ \text{zna}(r, w) = 2 \cdot K_{p2} \cdot k_p \cdot \text{Sym}(r) \cdot Hz \cdot H_{02}^2(w) + K_{p1} \cdot Hp \cdot [H_{02}^2(w) - 1] /_{r=1, w=B}; \quad Hp = 1 - h_v^2.$$

Характеристики комбинированного слоя. При изучении свойств комбинированного слоя основное внимание уделено безразмерной глубине профиля плоской поверхности $1 - \delta$ и коэффициенту конусности капилляра $-k_p$. Параметру δ присваиваются значения 0,024; 0,07; 0,111; 0,200; 0,273; 0,333. Оказывается, что уменьшение глубины профиля δ приводит к снижению расхода, а увеличение, наоборот, способствует его возрастанию. Эта зависимость проиллюстрирована на рис. 2,в, и подтверждает, что профилирование зазора в комбинации с вибрацией, определяет расход газа или кавитирующей жидкости [8] через зазор. На рис. 2,а и 2,б показано распределение давлений в плоском и цилиндрическом слоях, при этом в точке сращения (координата $r = 0,06$ для плоского слоя и координата $w=0$ для цилиндрического слоя) давления обоих слоев равны. В других граничных зонах ($r=1$ и $w=0,6$) давления равны между собой, но не равны атмосферному, поскольку при решении задачи были использованы асимптотические краевые условия.

Можно ожидать, что неравномерность распределения амплитуд колебаний или профилирование зазора приводят к одному и тому же - неравномерности распределения средних за период колебаний давлений. Однако величина градиента давлений может быть сформирована искусственно на этапе проектирования при профилировании поверхностей зазора, что обеспечивает большие значения расходов (рис. 2,в) по сравнению с использованием для организации расхода той или иной собственной формы колебаний [7]. Попытка усложнить форму колебаний приводит к необходимости увеличения частоты и, следовательно, к уменьшению амплитуды вибрации, что сводит к нулю усилия по увеличению расхода. Рассмотрим более подробно влияние профилирования зазора на расход.

Оценим влияние коэффициента конусности цилиндрического капилляра k_p . Исследуемый параметр варьируется в диапазоне $k_p = -0,5...1$ при условии физической реализуемости $d_1 \leq (d + d/2)$. Оказывается, что уменьшение наклона боковой поверхности капилляра приводит к уменьшению расхода, а отрицательное значение параметра k_p - к изменению направления течения газа (обратное указанному на рис. 1), что значительно снижает общую производительность

комбинированного слоя. На рис. 3, в представлена зависимость расхода от величины наклона боковой поверхности капилляра.

Увеличение амплитуды колебаний вибрирующих поверхностей h_{1v} , h_{2v} , h_v и отношения диаметров k приводит к увеличению расхода, а увеличение безразмерной длины капилляра B - к уменьшению расхода.

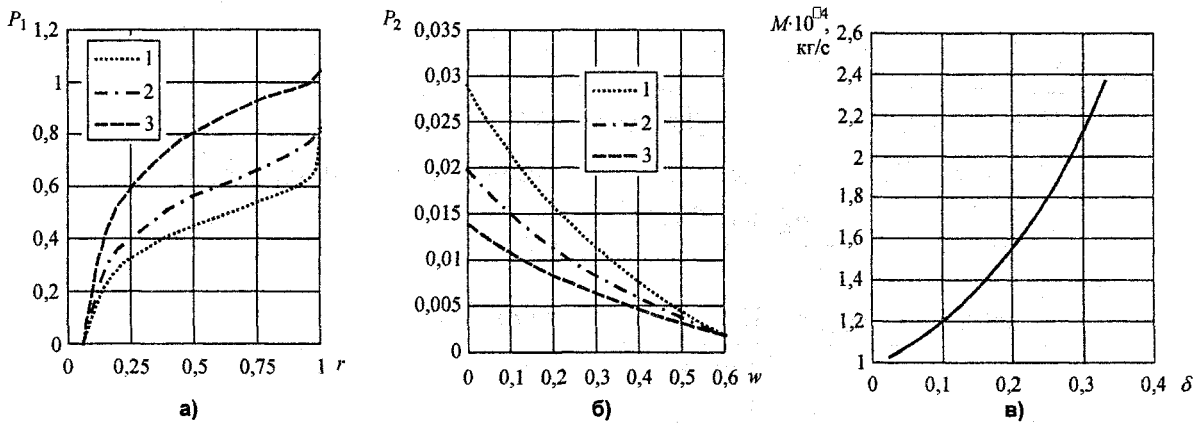


Рис. 2. Характеристики комбинированного слоя при различных значениях глубины профиля δ :
 а - распределение давлений в плоском слое; б - распределение давлений в цилиндрическом слое;
 в - массовый расход: 1 - $\delta=0,333$; 2 - $\delta=0,2$; 3 - $\delta=0,024$ ($n=0,17$, $z=0,667$, $k=0,06$, $B=0,6$, $h_{1v}=h_{2v}=0,5$, $h_v=0,06$, $k_p=0,833$)

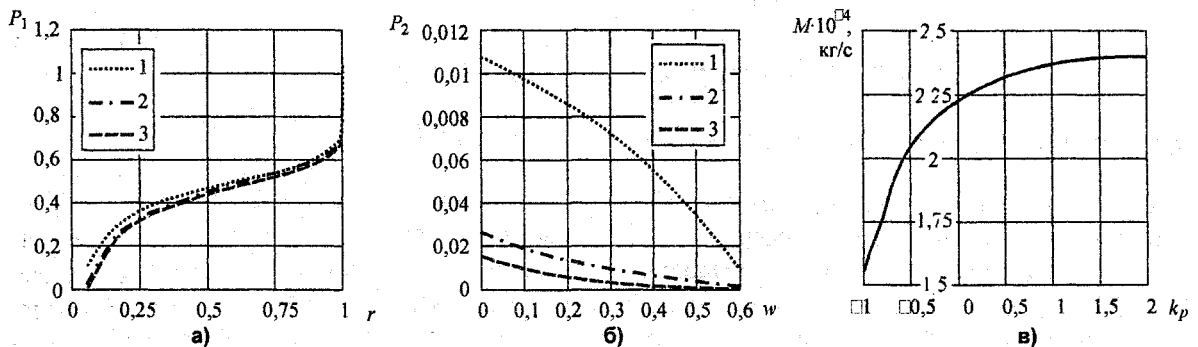


Рис. 3. Характеристики комбинированного слоя при различных значениях величины конустности k_p капилляра:
 а - распределение давлений в плоском слое; б - распределение давлений в цилиндрическом слое;
 в - массовый расход: 1 - $k_p=0,5$; 2 - $k_p=1$; 3 - $k_p=2$ ($n=0,17$, $z=0,667$, $k=0,06$, $B=0,6$, $h_{1v}=h_{2v}=0,5$, $h_v=0,06$, $\delta=0,333$)

При сопряжении слоев необходимо ставить вопрос об их согласовании. При ошибочно выбранных параметрах одного из слоев возможно снижение общей производительности. Например, в теории измерительных преобразователей [10] показано, что максимальная передаваемая мощность обеспечивается при равенстве входных и выходных импедансов преобразователей генераторного типа. Используя идею электромеханической аналогии, можно говорить о справедливости данного заключения и в нашем случае. Речь должна идти, в основном, о выборе конструктивных параметров зазора, а не об амплитуде колебаний, которая может быть подстроена непосредственно во время работы устройства на основе таких слоев. Выполнение приближенного равенства пневматических сопротивлений слоев, один из которых в нашем случае должен быть плоским конфузуром, а другой - цилиндрическим диффузором, обеспечивает работоспособность с улучшенной по сравнению с отдельным слоем производительностью.

Выводы. В работе рассмотрен эффект образования направленного движения газа в тонких зазорах с вибрацией в традиционной для теории газовой смазки постановки задачи. Однако изучен новый, никогда ранее не исследованный вопрос о профилировании зазора в целях реализации компрессорного действия слоя. Это позволило реализовать устройства, некоторые из которых выпускаются сейчас серийно [1]. Полученный таким образом компрессор можно отнести к ряду вибрационных, но работающего не в низкочастотном, а в ультразвуковом диапазоне частот,

причем верхнего порога по частоте здесь просто не существует. Это открывает дальнейшие пути для миниатюризации устройства.

Следует отметить возможность работы с жидкими средами, однако только в условиях кавитации среды, когда может быть развит известный эффект сдавливания слоя. Производительность такого насоса в десятки раз выше, чем газового, а преодоление порога кавитации можно реализовать гораздо легче, чем в открытых средах, т.к. обеспечивается почти полная локализация акустической энергии в зазоре. Этот прием был использован нами при проведении опытных испытаний по диспергации лакокрасочных суспензий на Челябинском лакокрасочном заводе [11], где в качестве диспергирующего устройства использовался вибронесущий подпятник, на вход которого поступала предварительно приготовленная в дисольвере смесь, а на выходе, после подачи питания и всплытия пяты, вытекала горячая пенящаяся краска.

Данная работа выполнена в целях оптимизации конструкции выпускаемого серийно газового компрессора, в частности, выявлено влияние цилиндрического капилляра на работу всего устройства, т. к. оказалось, что конусность капилляра, возникающая при сверлении, в зависимости от направления его установки в ультразвуковой концентратор может, как улучшать, так и ухудшать работоспособность всего устройства. Оказалось, что размеры капилляра и характерные размеры плоского зазора должны быть согласованы, что обеспечивает существенное увеличение его производительности. В частности, при согласовании параметров зазоров теоретически получено увеличение расхода вдвое по сравнению с плоским зазором, что подтверждено экспериментально.

Литература

1. Пат. 2121612 РФ, МКИВ 05 В 17/04. Ультразвуковой газовый компрессор и ороситель на его основе /С.Г. Некрасов и др. -№ 93032626/06; Заявлено 21.06.93; Оpubл. 10.11.98, Бюл. 31.
2. Pan. C.N.T. An Asymptotic Analysys of Gaseous Squeeze-Film Bearing// *Journal of Lubrication Technology: Trans. ASME; Ser. F.* -1967. - Vol. 89, № 3. - P. 245-253.
3. Некрасов С.Г. Радиальная газовая опора с эффектом бегущей волны// *Трение и износ в опорных узлах машин: Сб. научн. тр. -Екатеринбург: УрО АН СССР, 1990. -С. 97-102.*
4. Константинеску В.Н. Газовая смазка. М.: Машиностроение, 1968. - 718 с.
5. Pan. C.N.T. An Asymptotic Analysys of Gas Bearings Systems for Stability Dinamics and Fluid Mechanics // *Development in Mechanics.* - N.Y., 1965. - Vol. 3, Part 20f-P. 431-447.
6. Корн Г., Корн Т. *Справочник По математике для научных работников и инженеров.* - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1968. - 720 с.
7. Биушкин В.А., Мартынова Е.А. Статические характеристики газового радиального подвеса при изгибных резонансных колебаниях втулки // *Газовые опоры турбомашин: Сб. научн. статей.* -М.: МИХМ, 1976. - С. 36-44.
8. Некрасов С.Г. Датчики первичной инерциальной информации с виброподвесом на газированном слое жидкости// *Цифровые радиоэлектронные системы: журнал на электронных носителях.* - Челябинск: ЮУрГУ, 1998. -Т. 2.- http://www.drts.susu.ac.ru/~rvm/DRS_rus.html.
9. Некрасов С.Г, Пашнина НА. Задатчик расхода на основе осесимметричного профилированного зазора с вибрацией// *Известия Челябинского научного центра УрО РАН, 2004. - № 1. - С. 180-185. - http://csc.ac.ru/news/2004J/2004JJl_lr.pdf*
10. *Электрические измерения неэлектрических величин.* -Л.: Энергия, 1975. - 576 с.
11. Пат. 2081705 РФ, МКИ В 02 С 19/18. Устройство ультразвукового потокового диспергирования вязких лакокрасочных суспензий/ С.Г. Некрасов и др. - № 95106298/03; Заявлено 03.05.95; Оpubл. 20:06 97, Бюл. 17.