

МОДЕЛЬ ВОЗДУХОДУВКИ РУТСА

© 2012 Г. О. Белов, М. А. Ермилов, А. Н. Крючков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье приведена динамическая модель воздуходувки Рутса. Для расчётов газовой динамики применён квазистатический подход. Приведены подтверждения адекватности разработанной модели, предложена камера глушения выхлопа воздуходувки.

Воздуходувка Рутса, мгновенный расход, давление, рабочая камера, давление, температура, плотность, математическая модель.

Для моделирования необходимо математически задать профили роторов – для этого нужно разбить профиль ротора воздуходувки Рутса. Сделаем это с помощью концентрических окружностей (рис. 1) в поляр-

ных координатах $(R; \alpha)$ с центром в точке О. Определим α_i , соответствующие R_i по рис. 1, и составим по ним массив, представленный в табл. 1.

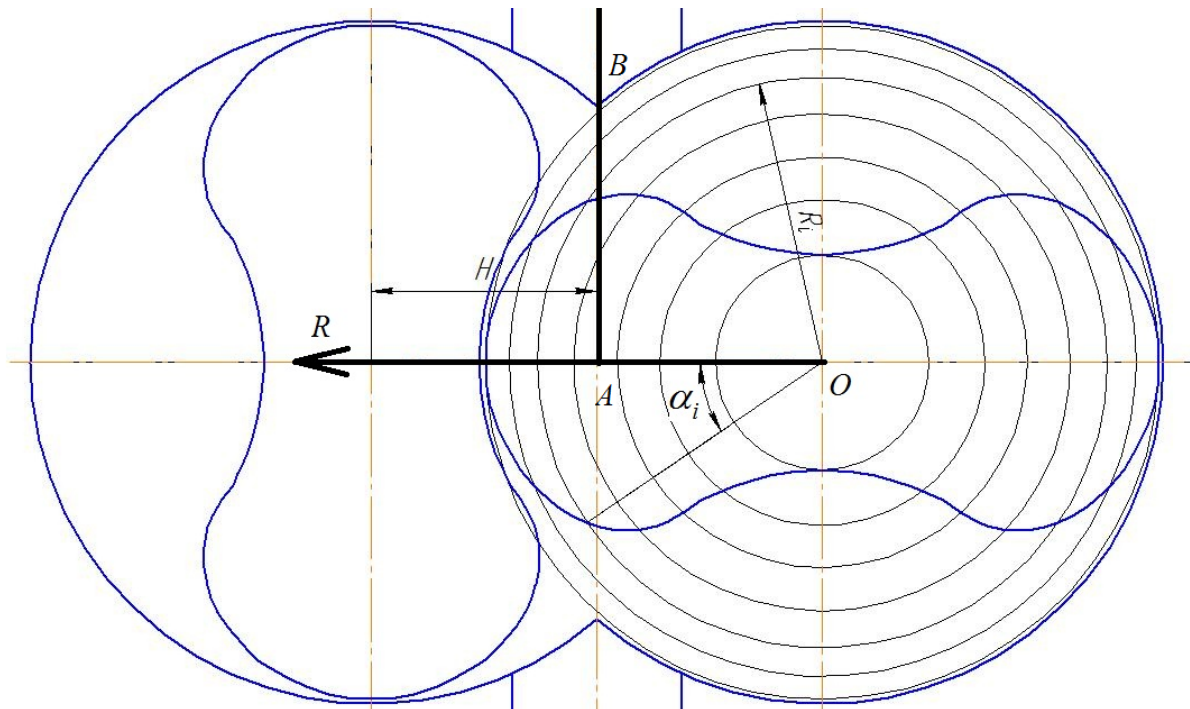


Рис. 1. Разбивка ротора с помощью концентрических окружностей

Таблица 1. Массив данных

	R_i	α_{i1}	α_{i2}	α_{i3}	β_i
1	R_1	α_1	$180^\circ - \alpha_1$	$-\alpha_1$	β_1
-	-	-	-	-	-
i	R_i	α_i	$180^\circ - \alpha_i$	$-\alpha_i$	β_i
-	-	-	-	-	-
N	R_N	α_N	$180^\circ - \alpha_N$	$-\alpha_N$	β_N

Все последующие расчёты ведутся с использованием массива.

Необходимо дополнить таблицу с помощью геометрических границ расчёта β_i (прямая АВ на рис. 1):

$$\beta_i(R_i) = \begin{cases} -\arccos\left(\frac{H}{R_i}\right) & \text{при } R_i \geq H; \\ 0 & \text{при } R_i < H. \end{cases}$$

Теперь в табл. 1 есть все геометрические данные для расчёта рабочего объёма камеры воздухоудвки Рутса.

Далее α_{i1} и α_{i2} даётся приращение 270° и ведётся расчёт по следующей формуле:

$$S_{1j} = \sum_{i=1}^N \Delta S_i, \quad (1)$$

где

$$\Delta S_i = \left[\pi r_i^2 - \pi (r_{i+1})^2 \right] \cdot \frac{1}{360^\circ} \times \begin{cases} \min\{\beta_i; \alpha_{i2}\} - \alpha_{i1} & \text{при } \alpha_{i1} < \beta_i; \\ 0 & \text{при } \alpha_{i1} \geq \beta_i. \end{cases}$$

Расчёт S_1 производится для каждого j -го шага (смещение полости на $\Delta\alpha$ – шаг по углу поворота шестерни).

Далее α_{i1} и α_{i3} даётся приращение 180° и ведётся расчёт:

$$S_{2j} = \sum_{i=1}^N \Delta S_i, \quad (2)$$

где

$$\Delta S_i = \left[\pi r_i^2 - \pi (r_{i+1})^2 \right] \cdot \frac{1}{360^\circ} \times \begin{cases} \min\{0; \alpha_{i1}\} - \max\{\beta_i; \alpha_{i3}\} & \text{при } \begin{cases} 0 > \alpha_{i1} > \beta_i; \\ 0 > \alpha_{i3} > \beta_i; \end{cases} \\ 0 & \text{при } \begin{cases} \alpha_{i1} \leq \beta_i; \\ \alpha_{i3} \geq 0. \end{cases} \end{cases}$$

Расчёт S_2 производится для каждого j -го шага (смещение полости на $\Delta\alpha$ – шаг по углу поворота шестерни).

Объём рассчитывается с помощью (1) и (2):

$$V_j = h \cdot (S_{1j} - S_{2j}), \quad (3)$$

где h – толщина зуба.

Расчёт S_1 , S_2 и V должен производиться на промежутке в 360° .

Далее рассчитывается площадь окна нагнетания, через которую опорожняется рабочая камера воздухоудвки. Для расчёта необходимы следующие значения:

$$\varphi_1 = -\arccos\frac{H-r}{R_1}; \quad \varphi_2 = -\arccos\frac{H}{R_1}; \quad \alpha_{11}; \quad \alpha_{12}.$$

r – радиус выходного патрубка.

Далее α_{11} и α_{12} даётся приращение 270° и ведётся расчёт:

$$S_{Hj} = \begin{cases} \frac{r^2}{2} Y & \text{при } \phi_2 > \alpha_{12} > \phi_1; \\ \frac{\pi r^2}{2} & \text{при } \begin{cases} \alpha_{12} > \phi_2; \\ \alpha_{11} > \phi_1; \end{cases} \\ 0 & \text{при } \begin{cases} \alpha_{12} < \phi_2; \\ \alpha_{11} < \phi_1; \end{cases} \\ \frac{r^2}{2} Y & \text{при } \phi_2 > \alpha_{11} > \phi_1; \end{cases}$$

$$Y = \left(\pi - \frac{2\pi \arccos\left(\frac{H-R_1 \cos \alpha_{12}}{r}\right)}{360^\circ} + \sin \left[2 \arccos\left(\frac{H-R_1 \cos \alpha_{12}}{r}\right) \right] \right)$$

Расчёт S_H производится для каждого j -го шага (смещение полости на $\Delta\alpha$ – шаг по углу поворота шестерни) на промежутке в 360° .

Для расчёта газовой динамики берутся массивы S_H и V , полученные ранее.

На момент открытия окна нагнетания (начало расчёта, когда S_H становится больше 0) давление, температура, масса, плотность газа в рабочей камере, а также расход из неё ($p_0, T_0, m_0, \rho_0, G_0$) определялись следующим образом:

$$p_0 = p_{BX},$$

где p_{BX} – давление газа на входе в воздухоудвку;

$$\rho_0 = \rho_{BX},$$

где ρ_{BX} – плотность газа на входе в воздухоудвку;

$$T_0 = T_{BX},$$

где T_{BX} – температура газа на входе в воздухоудвку;

$$G_0 = \begin{cases} A_1, & \text{если } \left\{ p_0 > p_H; \frac{p_H}{p_0} < \xi_{KP} \right\} \\ A_2, & \text{если } \left\{ p_0 > p_H; \frac{p_H}{p_0} > \xi_{KP} \right\} \\ A_3, & \text{если } \left\{ p_H > p_0; \frac{p_0}{p_H} > \xi_{KP} \right\} \\ A_4, & \text{если } \left\{ p_H > p_0; \frac{p_0}{p_H} < \xi_{KP} \right\} \end{cases}$$

$$\text{где } A_1 = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \cdot S_0 \frac{p_0}{\sqrt{T_0}},$$

$$A_2 = S_0 \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_0 \rho_0 \left(\left(\frac{p_H}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_H}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)},$$

$$A_3 = -S_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_H \rho_H \left(\left(\frac{p_0}{p_H} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_0}{p_H} \right)^{\frac{2}{k}} \right)},$$

$$A_4 = -\sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \cdot S_0 \frac{p_H}{\sqrt{T_H}},$$

p_H - давление нагнетания,

ρ_H - плотность в полости нагнетания,

T_H - температура в полости нагнетания,

ξ_{KP} - критический перепад давления;

$$m_0 = V_0 \rho_0.$$

Для последующих шагов вычислений справедливы следующие зависимости:

$$m_i = m_{i-1} - G_{i-1} \cdot \Delta t,$$

где $\Delta t = \frac{60}{n} \cdot \frac{\Delta \alpha}{360^\circ}$ - итерация по времени;

n - частота вращения ведущего вала;

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i};$$

$$p_i = p_{i-1} \left(\frac{\rho_i}{\rho_{i-1}} \right)^k;$$

$$T_i = T_{i-1} \left(\frac{p_{i-1}}{p_i} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Расчёт G_i производится аналогично G_0 при соответствующей замене в выражениях S_0, p_0, T_0, ρ_0 на S_i, p_i, T_i, ρ_i . Расчёт прекращается, когда S_H становится равным 0. Полученную зависимость $G(\alpha)$ нужно взять ещё три раза (чтобы получить расход от всех четырёх рабочих камер), каждый раз смещая её на фазу 90° и сложить все четыре массива. В результате получится мгновенная подача воздухоудвки Рутса.

Была исследована поверочная установка счётчиков расхода газа. Для того, чтобы разработать эффективную конструкцию камеры заглушения в помещении с установкой (рис. 2), было необходимо рассчитать пульсации расхода в нагнетающей магистрали установки и построить их спектрограммы.



Рис. 2. Стенд, оснащённый воздухоудвками Рутса

Расчёт производился с помощью приведённой выше модели, которая была реализована в Excel. На рис. 3, 4 показаны зависимости мгновенной подачи двух разных воздуходувок Рутса, установленных на испыта-

тельном стенде ОАО «Метрология и автоматизация» от угла поворота ведущего вала.

С помощью быстрого преобразования Фурье были получены спектрограммы пульсаций расхода обеих воздуходувок, которые представлены на рис. 5, 6.

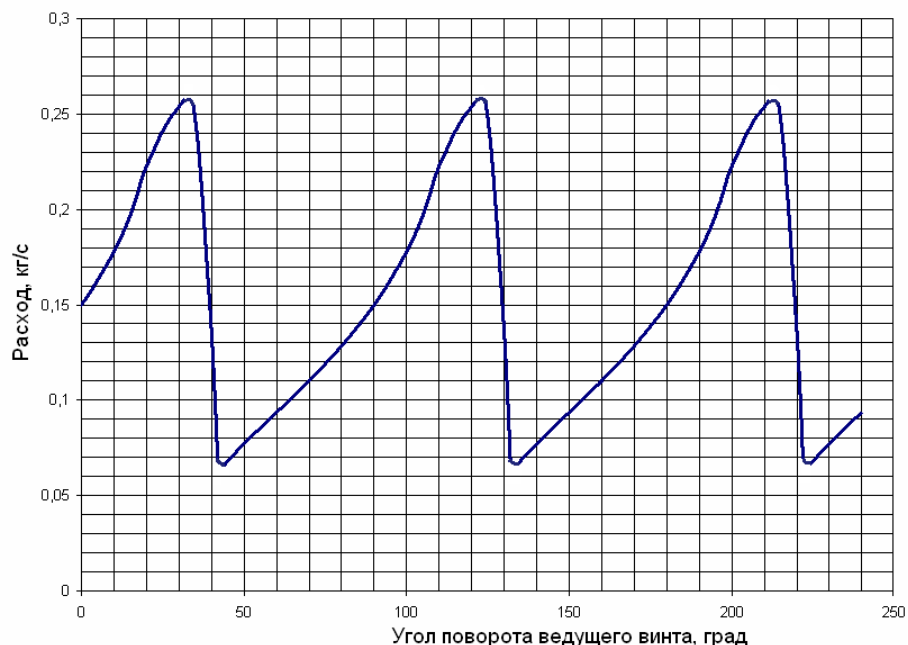


Рис. 3 Мгновенная подача воздуходувки Рутса 2AF53M2-MH50-10,68-3-11 (3000об/мин). Коэффициент неравномерности для этого агрегата составил 2

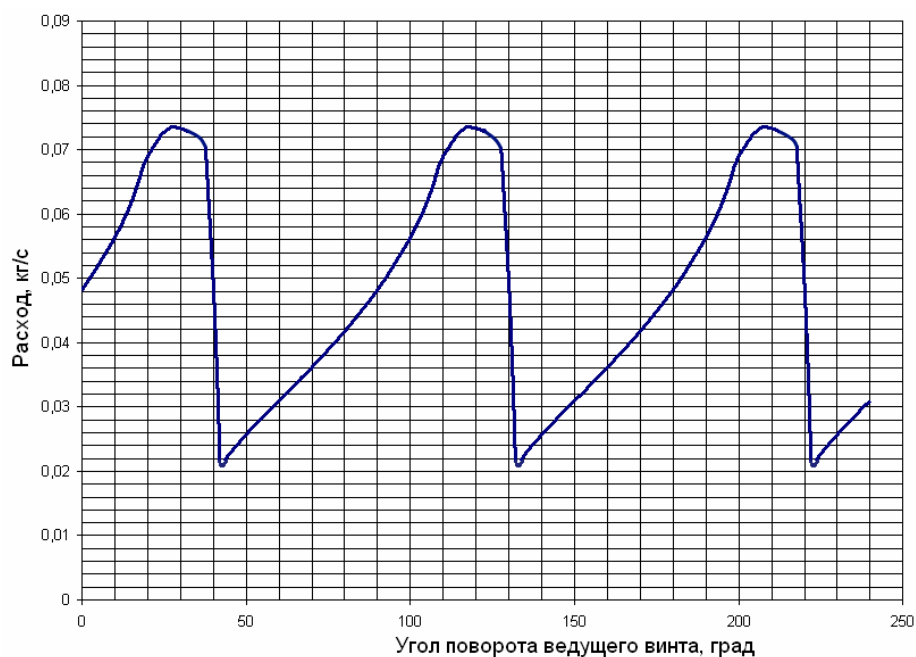


Рис. 4 Мгновенная подача воздуходувки Рутса 2AF51M1-MH50-2,52-1,5-4 (1500об/мин). Коэффициент неравномерности для этого агрегата составил 1,5

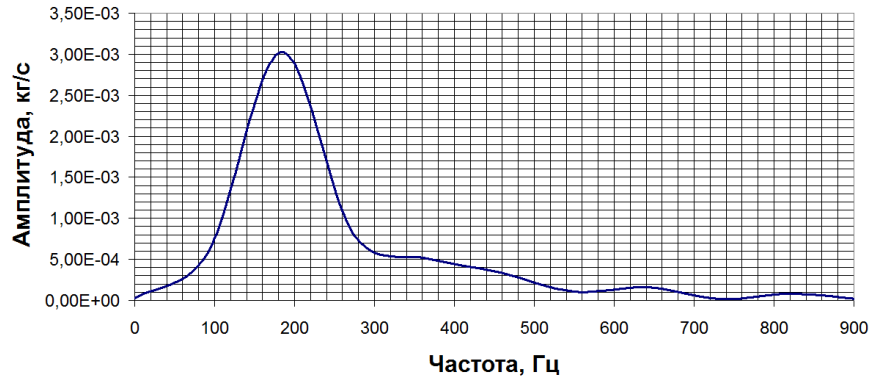


Рис. 5. Спектр мгновенной подачи воздухоудвки Рутса 2AF53M2-MH50-10,68-3-11

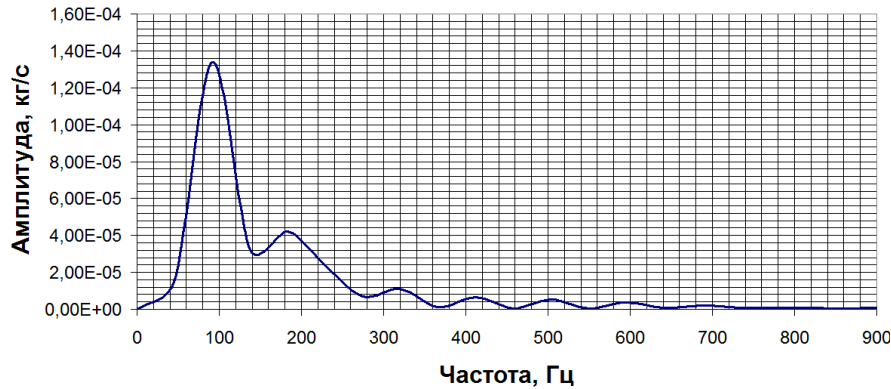


Рис. 6. Спектр мгновенной подачи воздухоудвки Рутса 2AF51M1-MH50-2,52-1,5-4

Измерение шума непосредственно на объекте показало преобладание в спектре шума гармоник на частотах 100 и 200 Гц, что косвенно подтверждает разработанную математическую модель.

Для установки была предложена камера глушения, позволяющая снизить воздушный шум. Анализ данных, представленных на рис. 5, 6, показал, что максимальные амплитуды у гармоник с частотами 100 Гц, 200 Гц. Это соответствует гармоникам, создаваемым воздухоудвками Рутса. Основная часть звуковой энергии в таких случаях обычно передаётся по трубам и создаёт большой шум на выхлопе, о чем свидетельствуют измерения. Но не стоит забывать о том, что корпус компрессора и электродвигатель, вибрируя при работе, как правило, создают шум на тех же частотах. Именно поэтому сами производители компрессоров часто комплектуют или предлагают за отдельную плату шумоизолирующие кожухи. Схема разработанной камеры глушения выхлопа воздухоудвки Рутса приведена на рис. 7.

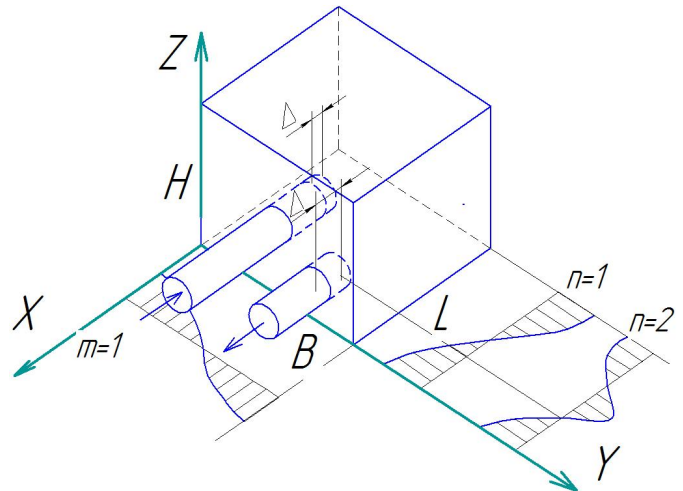


Рис. 7. Схема разработанной камеры глушения воздухоудвки Рутса

Таким образом, разработана математическая модель воздухоудвки Рутса, учитывающая конструктивные и режимные параметры, свойства рабочего газа и позволяющая рассчитывать мгновенную производительность. Разработана камера глушения выхлопа установки, содержащей четыре воздухоудвки Рутса.

SIMULATING OF ROOTS COMPRESSOR

© 2012 G. O. Belov, M. A. Ermilov, A. N. Kryuchkov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The dynamic model of a Roots compressor is given in article. Also indirect confirmations of adequacy of the developed model are given in article and the chamber of muffling of an exhaust of a compressor.

Roots compressor, instant expense, pressure, working chamber, pressure, temeperatura, density, mathematical model.

Информация об авторах

Белов Глеб Олегович, кандидат технических наук, ассистент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: glebbelov@mail.ru. Область научных интересов: гидравлика, пневматика.

Ермилов Михаил Анатольевич, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: juk-suchodol11@yandex.ru. Область научных интересов: гидравлика, пневматика.

Крючков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kan@ssau.ru. Область научных интересов: виброакустика машин.

Belov Gleb Olegovich, Candidate of Technical Sciences, assistant of Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: glebbelov@mail.ru. Area of Research: fluid power.

Ermilov Mikhail Anatolievich, postgraduate student of Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: juk-suchodol11@yandex.ru. Area of Research: fluid power.

Kryuchkov Alexander Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: kan@ssau.ru. Area of Research: acoustics.