

УДК 621.514

Расчет изменения зазоров между профильными поверхностями винтового компрессора

Д-р техн. наук А. Н. НОСКОВ

dn.noskoff@rambler.ru

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Приводится метод расчета изменения зазоров между винтами по нормали к винтовой поверхности. Разработанный метод позволяет выбрать величины минимально безопасных рабочих зазоров, повысив тем самым объемные и энергетические показатели работы винтовых компрессоров.

Ключевые слова: винтовой компрессор, профильный зазор, паровая холодильная машина, рабочее вещество.

Calculation of change of gaps between profile surfaces of the screw compressor

D. Sc. A. N. NOSKOV

dn.noskoff@rambler.ru

University ITMO

Institute of Refrigeration and Biotechnologies
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The method of calculation of change of gaps between screws on a normal to a screw surface is given. The developed method allows to choose sizes of minimum safe working gaps, having raised thereby volume and power indicators of operation of screw compressors.

Keywords: screw compressor, profile gap, steam refrigerator, working substance.

Наличие зазоров между профильными поверхностями винтового компрессора приводит к массообмену и обмену энергией между сопряженными парными полостями. Это является причиной потери потенциальной энергии давления в процессе сжатия, подогрева рабочего вещества в процессе всасывания и уменьшения объема вновь всасываемого пара. Таким образом, характерной особенностью рабочего процесса холодильного винтового компрессора является наличие внутреннего массообмена, который существенно влияет на его объемные и энергетические коэффициенты.

Для расчета массообмена между рабочими органами винтового компрессора (ВК) необходимо знать величины зазоров по нормали к винтовым поверхностям, т. е. для каждой щели, через которую происходит массообмен, записать уравнения

$$\delta^N = f(\tau, t),$$

где τ, t — параметры положения и профиля соответственно.

Величины рабочих зазоров в торцевой плоскости определяют по формуле

$$\delta^T = \delta_0^T - \Delta\delta^T,$$

где $\delta^T, \Delta\delta^T$ — соответственно начальные зазоры и изменения зазоров в торцевой плоскости.

В общем случае изменение профильных зазоров в торцевой плоскости определяется выражением

$$\Delta\delta^T = \Delta\delta_{\text{ВЩ}}^T + \Delta\delta_{\text{ВМ}}^T - \Delta\delta_A^T,$$

где $\Delta\delta^T$ — суммарное изменение профильного зазора в торцевой плоскости; $\Delta\delta_{\text{ВЩ}}^T, \Delta\delta_{\text{ВМ}}^T$ — изменение профильного зазора в результате теплового расширения соответственно ведущего (ВЩ) и ведомого (ВМ) винтов; $\Delta\delta_A^T$ — изменение профильного в торцевой плоскости в результате увеличения межцентрового расстояния.

Метод определения изменений зазоров в торцевой плоскости приведен в работах [1–3].

В произвольной точке линии зацепления переход от зазоров в торцевой плоскости к зазорам по нормали к винтовой поверхности осуществляют по зависимости:

$$\delta^N = \delta^T \cos\beta,$$

где β — угол между нормалью к винтовой поверхности в рассматриваемой точке и проекцией этой нормали на плоскость, перпендикулярную оси винта.

Винтовую поверхность ротора компрессора можно представить как результат движения плоской кривой ab , образующей профиль винта в торцевом сечении, параллельно торцевой плоскости вдоль оси винта.

Пусть плоская кривая ab , составляющая часть профиля винта и лежащая в торцевой плоскости задана уравнением в параметрической форме:

$$\left. \begin{aligned} x &= u(t); \\ y &= v(t); \\ z &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где x, y — координаты кривой ab в торцевой плоскости; t — параметр участка профиля.

При повороте кривой ab на угол τ вокруг оси винта постоянного хода H , каждая ее точка также поворачивается на этот угол и одновременно перемещается вдоль оси винта z , при этом сохраняется постоянная пропорциональная зависимость между этими величинами:

$$z = \frac{H}{2\pi} \tau = P\tau,$$

где P — осевая константа винта.

Винтовая поверхность, которая получается в результате такого движения, описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} x &= u(t)\cos t - v(t)\sin t; \\ y &= u(t)\sin t + v(t)\cos t; \\ z &= P\tau. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(знаки выбраны для винта правой нарезки и правых осей координат).

Вектор \overline{N}_{xy} — проекция нормали к винтовой поверхности в произвольной точке \overline{N} на плоскость, параллельную торцевой плоскости. Абсолютная величина этого вектора

$$N_{xy} = \sqrt{N_x^2 + N_y^2},$$

где N_x, N_y — абсолютные величины векторов \overline{N}_x и \overline{N}_y , соответственно.

Величина косинуса угла β между векторами \overline{N} и \overline{N}_{xy} :

$$\begin{aligned} \cos \beta &= \cos(\overline{N}, \overline{N}_{xy}) = \frac{N_{xy}}{N} = \\ &= \sqrt{\cos^2(\overline{N}, \overline{N}_x) + \cos^2(\overline{N}, \overline{N}_y)}, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь $\cos(\overline{N}, \overline{N}_x) = \frac{N_x}{N}$, $\cos(\overline{N}, \overline{N}_y) = \frac{N_y}{N}$.

По данным справочника [4], уравнение нормали \overline{N} к поверхности, заданной в параметрической форме, в точке с координатами x, y, z определяется уравнением

$$\frac{X-x}{N_x} = \frac{Y-y}{N_y} = \frac{Z-z}{N_z},$$

где x, y, z — текущие координаты нормали, а составляющие вектора \overline{N} равны:

$$N_x = \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \\ \frac{\partial y}{\partial \tau} & \frac{\partial z}{\partial \tau} \end{vmatrix}; \quad N_y = \begin{vmatrix} \frac{\partial z}{\partial t} & \frac{\partial x}{\partial t} \\ \frac{\partial z}{\partial \tau} & \frac{\partial x}{\partial \tau} \end{vmatrix}; \quad N_z = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \\ \frac{\partial x}{\partial \tau} & \frac{\partial y}{\partial \tau} \end{vmatrix}.$$

Применяя эти выражения, определим составляющие нормали \overline{N} к винтовой поверхности

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{\partial y}{\partial t} \cdot \frac{\partial z}{\partial \tau} - \frac{\partial z}{\partial t} \cdot \frac{\partial y}{\partial \tau} = \\ &= \left(\frac{\partial u}{\partial t} dt \cdot \sin t + \frac{\partial v}{\partial t} dt \cdot \cos t \right) P = \frac{\partial y}{\partial t} P, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} N_y &= \frac{\partial z}{\partial t} \cdot \frac{\partial x}{\partial \tau} - \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{\partial z}{\partial \tau} = \\ &= - \left(\frac{\partial u}{\partial t} dt \cdot \cos t - \frac{\partial v}{\partial t} dt \cdot \sin t \right) P = - \frac{\partial x}{\partial t} P, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N_z &= \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{\partial y}{\partial \tau} - \frac{\partial y}{\partial t} \cdot \frac{\partial x}{\partial \tau} = \\ &= \left(\frac{\partial u}{\partial t} dt \cdot \cos t - \frac{\partial v}{\partial t} dt \cdot \sin t \right) \times \\ &\times (u \cdot \cos t - v \cdot \sin t) - \\ &- \left(\frac{\partial u}{\partial t} dt \cdot \sin t + \frac{\partial v}{\partial t} dt \cdot \cos t \right) \times \\ &\times (-u \cdot \sin t - v \cdot \cos t) = \frac{\partial x}{\partial t} x + \frac{\partial y}{\partial t} y. \end{aligned} \quad (5)$$

Направляющие косинусы нормали \overline{N} определяют по формулам (2), где величина нормирующего множителя:

$$\begin{aligned} N &= \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2} = \\ &= \sqrt{\left[\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 \right] \rho^2 + \left[\frac{\partial x}{\partial t} x + \frac{\partial y}{\partial t} y \right]^2}. \end{aligned}$$

Таким образом, по формулам (1)–(5) определяется величина угла β для любой точки винтовой поверхности.

Номинальный (производственный) профиль зубьев в торцевом сечении, обеспечивающий минимально безопасные рабочие зазоры между роторами, как правило, получают путем занижения теоретического профиля ведомого винта при номинальном межцентровом расстоянии [5]. Номинальный профиль зубьев должен обеспечивать гарантированные зазоры между винтами при любых изменениях режима работы компрессора. Температура нагнетания как маслозаполненного холодильного компрессора, так и компрессора сухого сжатия не превышает 100 °С во всем диапазоне их работы [6]. Экспериментальное исследование винтового компрессора сухого сжатия в режимах паровой холодильной машины на кафедре холодильных машин ИХиБТ НИУ ИТМО проводилось и на ВК с винтами с асимметричным циклоидальным профилем СКБК, имеющими такие же начальные зазоры, как у маслозаполненного ВК. Внешние диаметры винтов $D_1 = D_2 = 125$ мм; длина винтов $l_b = 168$ мм; относительный ход ВЩ винта $\overline{H}_1 = H_1 / D_1 = 1,6$.

На рис. 1 показана зависимость $\cos \beta$ для винтов экспериментального ВК от угла поворота ведущего винта φ_1 по следующим линиям контакта винтов: 2–3 — по передней части зуба ВЩ винта; 1–2 — по вершине зуба ВЩ винта; 1–6 — по тыльной части зуба ВЩ винта; 3–4 и 5–6 — по головке зуба ВМ винта; 4–5 — по впадине ВЩ винта (θ_1, θ_3 — центральные углы между осью зуба ВЩ винта и прямыми, проведенными из центра ВЩ винта в точку пересечения передней части зуба соответственно с начальной окружностью и окружностью впадин; θ_2, θ_4 — центральные углы между осью зуба ВЩ винта и прямыми, проведенными из центра ВЩ винта в точку пересечения тыльной части зуба соответственно с начальной окружностью и окружностью впадин; β_{01} — угол между линией центров и лучом, проведенным через центр ВЩ винта и точку пересечения внешней окружности ВЩ винта и начальной окружности ВМ винта; $2\gamma_{23.1}$ — центральный угол ВЩ винта, соответствующий его впадине; углу $\varphi_1 = 0$ соответствует совпадению вершины зуба ВЩ винта с линией центров).

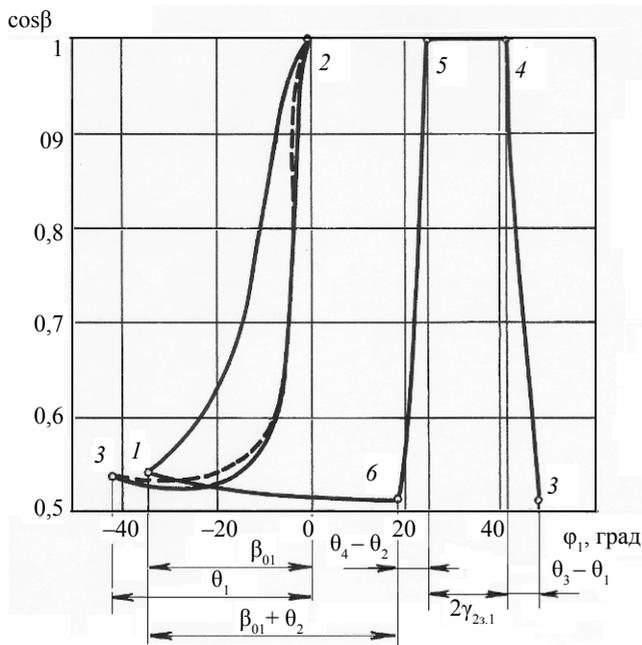


Рис. 1. Зависимость $\cos\beta$ от угла поворота ведущего винта φ_1

Максимальное изменение зазоров между винтами происходит при режиме работы ВК с температурой пара на нагнетании $t_n = 100\text{ }^\circ\text{C}$ и температурой всасывания $t_{вс} = 5\text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 2 приведена зависимость изменения зазоров экспериментального ВК в торцевой плоскости $\Delta\delta^T$ (а) и по нормали $\Delta\delta^N$ (б) от угла поворота ВЩ винта φ_1 на этом режиме. Величина угла $\varphi_1 = 0$ соответствует совпадению вершины зуба ВЩ винта с линией центров. Кривые I соответствуют моменту подхода линии контакта парной полости 1–6–5–4–3–2–1 к торцу нагнетания (передняя точка 1 линии контакта касается торца нагнетания), а кривые II, построенные для линий контакта 1–2 и 2–3, соответствуют моменту касания торца нагнетания точкой 3 этих линий. Пунктирной линией на рис. 2 показано изменение зазора по линии зацепления 2–3 при выполнении передней части зуба ВЩ винта в соответствии с указаниями [7].

Приведенный метод определения минимально безопасных рабочих зазоров использовался при расчете объемных и энергетических коэффициентов винтовых компрессоров и позволил повысить их точность.

Список литературы

1. Пекарев В. И., Ведайко В. И., Носков А. Н. Методика расчета объемных и энергетических показателей холодильного винтового компрессора сухого сжатия/РТМ 0555-133-87: Минхиммаш, 1987.
2. Сагун И. А. Винтовые компрессоры. — Л.: Машиностроение, 1970.
3. Сагун И. А., Носков А. Н. Динамика изменения зазоров винтового компрессора сухого сжатия/Повышение эффективности холодильных машин: Сб. научн. тр. — Л.: ЛТИХП, 1980.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1978.

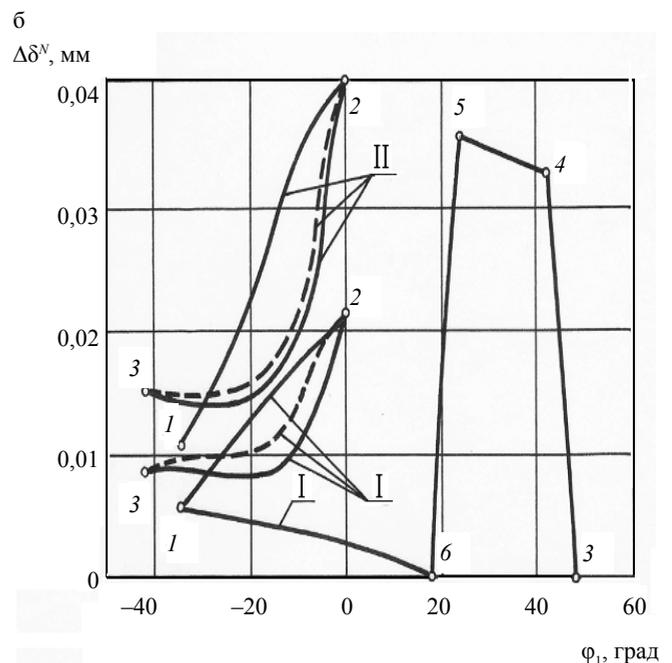
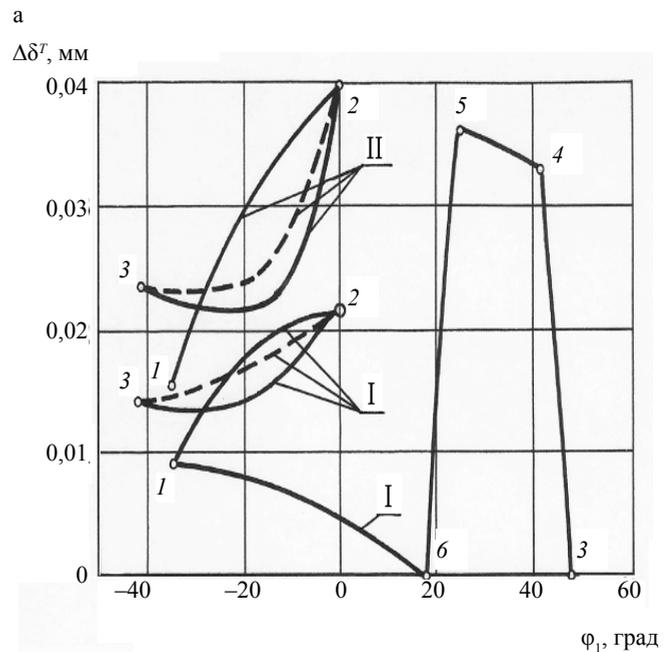


Рис. 2. Зависимость изменения зазоров от угла поворота ведущего винта φ_1 : а — в торцевой плоскости ($\Delta\delta^T$); б — по нормали к винтовой поверхности ($\Delta\delta^N$).

5. Амосов П. Е., Бобриков Н. И., Шварц А. И., Верный А. Л. Винтовые компрессорные машины: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1977.
6. Пекарев В. И., Ведайко В. И., Носков А. Н. Исследование работы холодильного винтового компрессора «сухого сжатия» на хладагенте R22. // Холодильная техника. 1986. № 6.
7. Пат. 2109170 России, МКИ F04C 18/16. Зубчатое зацепление винтового компрессора/А. Н. Носков. 1998. Бюл. № 11.