

И. Г. Хисамеев, Р. Р. Якупов, В. Н. Налимов

АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ

В РАЗРАБОТКЕ ПРОФИЛЕЙ ВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРОВ

Ключевые слова: профиль ротора, винтовой компрессор, кривая, профильный зазор.

Проведен анализ патентов профилей роторов винтовых компрессоров с целью определения перспективных направлений в профилировании роторов. Показано распределение целей достижаемых в патенте и типов кривых используемых при профилировании. Так же приведен обзор статей связанных с профилированием винтовых поверхностей роторов.

Key words: Rotor shape, screw compressor, curve, rotor profile clearance.

Analysis has been carried out of the patents for the rotor shape of screw compressors with the aim of determination of prospective trends in forming rotors to shape. Distribution of types of curves used for forming the rotor shape as well as distribution of the objectives sought in the patents, have been shown. Additionally, the paper reviews of recent works regarding to the development of the rotor shape of screw compressors.

Винтовые профильные поверхности ротора – это наиболее сложные и точные элементы конструкции винтового компрессора, от правильного подбора и изготовления которых в значительной степени зависят энергетические показатели всего компрессора.

В 70-х годах прошлого столетия в ЗАО «НИИтурбокомпрессор» (СКБК) были проведены комплексные исследования для определения влияния основных геометрических параметров профиля на его энергетические показатели. Результатом этих исследований явилась разработка широкоизвестного асимметричного «профиля СКБК» [1]. Этот профиль получил широкое распространение в промышленном производстве винтовых компрессоров в отечественном компрессоростроении. Дальнейшее совершенствование профиля было проведено в 80-90 годах и в основном затрагивало технологическое совершенствование «профиля СКБК». Эти работы были защищены авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ.

Целью данной работы является определение перспективных направлений в совершенствовании профильных поверхностей винтовых компрессоров.

Для проведения анализа патентной ситуации были просмотрены реферативные журналы за 1987-2010 годы. Из них были отобраны патенты и статьи, касающиеся совершенствования профилей винтовых компрессоров.

Анализ распределения количества патентов относительно поставленных в патентах целей представлен на рис. 1. Из представленной диаграммы рассмотрим более подробно характерные решения, встречающиеся в патентах, исходя из полученной классификации.

Наиболее часто встречающейся целью в патентах является уменьшение протечек через щели. Основная часть патентов предлагает увеличение глубины дросселирования по вершине зуба ведущего ротора с помощью введения дуги окружности или другой кривой на вершине зуба.

Также предлагается увеличить глубину дросселирования, используя кривые, которые до этого не использовались в профилях. Например, в патенте US 5,524,250 участок на задней стороне ведущего ротора описан параболой $f(x) = a_{10}x^2 + b_{10}x + c_{10}$, подбирая коэффициенты a_{10} и b_{10} параболы можно оптимизировать профиль, увеличивая глубину щели по линии контакта и уменьшая защемленные объемы.

Немного меньший объем патентов посвящен достижению улучшения крутящего момента (рис. 1). В маслозаполненных компрессорах винтовые роторы выполняют также роль зубчатого зацепления, т.е. передают крутящий момент. Поэтому помимо улучшения газодинамических характеристик профиля необходимо учитывать и механические характеристики, т.к. они влияют на КПД машины, вибрацию, шум.

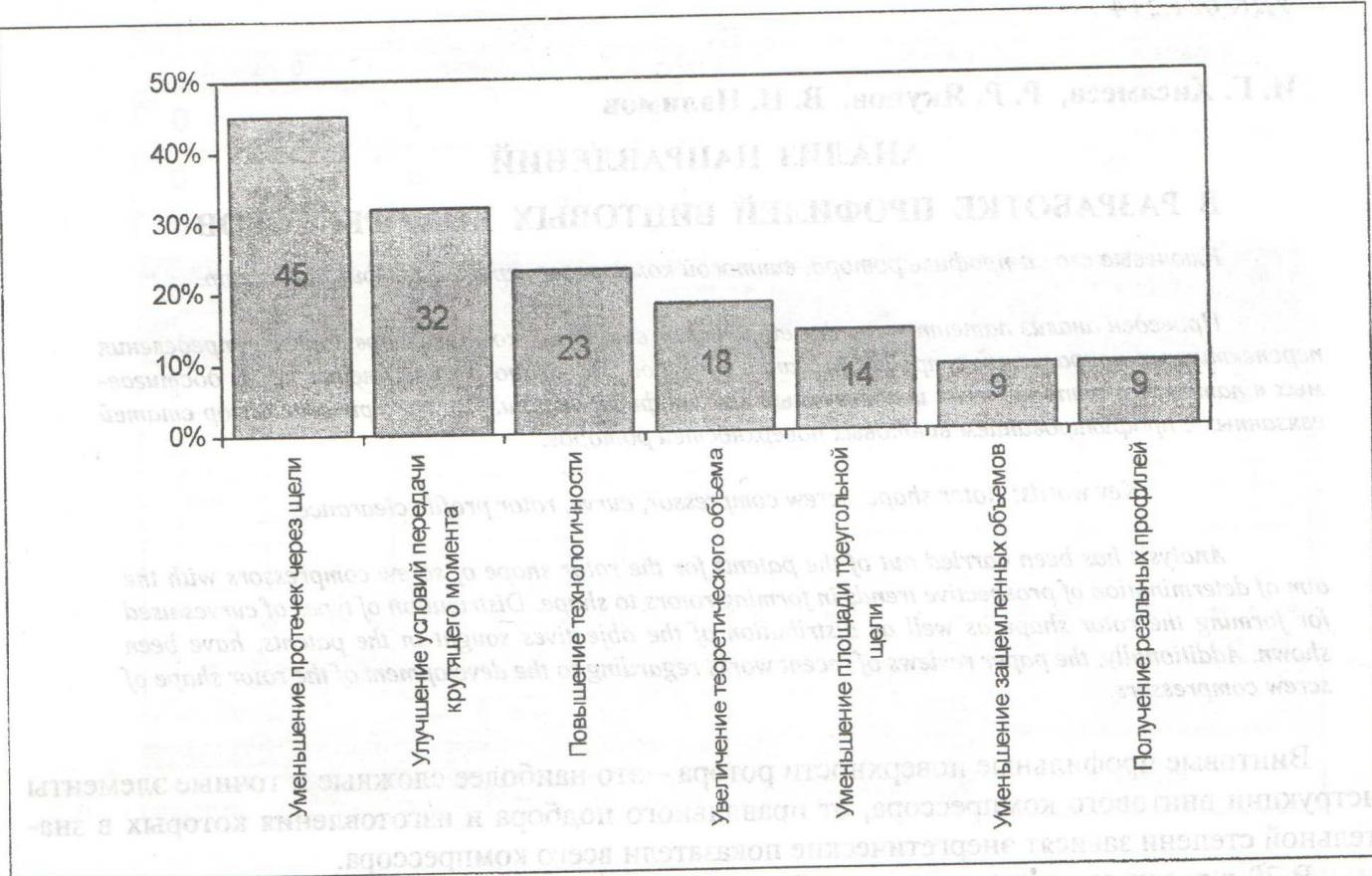


Рис. 1 – Распределение целей, встречающихся в патентах

Физическая суть предлагаемого технического решения исходит из распределения сил, действующих в зубчатом зацеплении.

В косозубых колесах полное давление P_n на зуб, действующее по нормали к рабочей поверхности зуба, можно разложить на три взаимно перпендикулярные составляющие (рис. 2) [2].

Первая составляющая представляет собой окружное усилие P_r , направленное по касательной к начальной окружности,

$$P_r = \frac{2M_{kp}}{d}, \quad (1)$$

где M_{kp} – крутящий момент; d – диаметр начальной окружности.

Вторая составляющая представляет собой осевое усилие P_s , направленное параллельно оси вращения колеса,

$$P_s = P t g \beta, \quad (2)$$

где β – угол наклона зуба.

Третья составляющая представляет собой распорную силу P_t , направленную перпендикулярно оси вращения колеса,

$$P_t = P t g \alpha_s, \quad (3)$$

где α_s – угол зацепления в торцовом сечении колеса.

Для улучшения условий передачи момента от одного ротора к другому, предлагается минимизировать распорное усилие, что позволит уменьшить потери энергии на трение поверхностей винтов и, следовательно, уменьшить изнашивание зубьев.

Для уменьшения распорного усилия необходимо уменьшать угол α_s (рис. 2). В патентах же часто рассматривается угол смежный углу профиля – угол давления, т.е. угол между нормалью к профилю N в точке его пересечения E_1 с начальной окружностью и нормалью к этой окружности O_1E_1 , который необходимо увеличивать для достижения лучших характеристик.

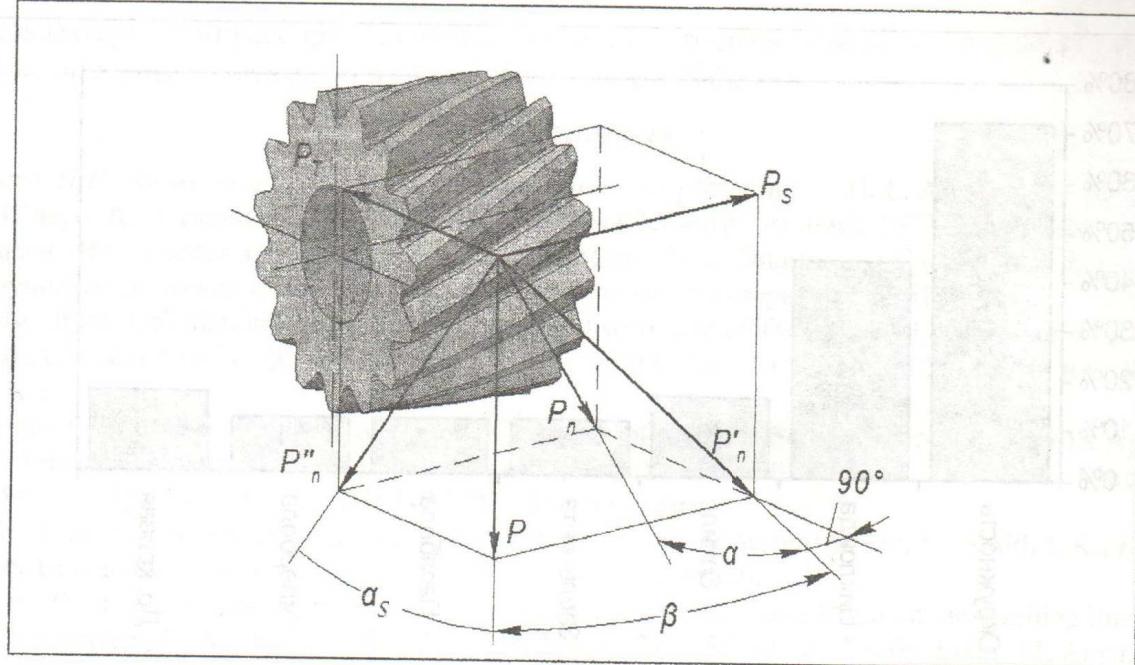


Рис. 2 – Силы в зубчатом зацеплении

Для этого в головках зубьев ведомого ротора вводят участки в виде дуг окружностей с большим радиусом, как это сделано в патенте US 4,576,558.

В российских патентах предлагаются профили с эллипсом или дугой окружности RU 2117824 в основании ведущего зуба, что также позволяет увеличить угол давления.

Значительная часть патентов посвящена решению проблемы технологичности изготовления роторов (рис. 1).

Для облегчения производства роторов предлагается использование эвольвент в профилях роторов. В патенте US 4,643,654 эвольвенты используются для описания всего профиля, что позволяет использовать метод обкатки рейкой для производства роторов, при этом обеспечивается герметизация полостей сжатия. Помимо технологичности данный профиль имеет короткую линию контакта и регулируемую треугольную щель.

Среди рассмотренных патентов можно выделить патенты, имеющие цель увеличение теоретического объема. В большинстве патентов это достигается подбором параметров существующих кривых либо изменении пропорций зуба, например, в патенте US 4,583,927 предлагается профиль роторов с оптимальной пропорцией головки зуба на ведомом роторе, что позволит увеличить наружный диаметр роторов и, следовательно, теоретический объем.

Еще одним направлением в разработке профилей является уменьшения площади треугольной щели. В патенте US 5,460,495 головка зуба описывается несколькими дугами окружности, что позволяет уменьшить площадь треугольной щели.

В патенте US 4,576,558 для уменьшения защемленных объемов предлагается набор кривых, который при уменьшении защемленного объема приводит к появлению дополнительной полости, которая, как утверждают заявители, не влияет на характеристики.

Часть патентов посвящена получению реальных (действительных) профилей. В патенте US 4,671,751 предложен метод, при котором реальный профиль в одной точке приближается к теоретическому, а в других точках имеет плавно изменяющееся занижение, что позволяет обеспечить качественное зацепление даже при наличии.

Для достижения основных целей, описанных выше, в патентах в основном патентуется совокупность кривых, образующих профильную поверхность.

Анализ кривых, используемых при профилировании с распределением по частоте использования, приведен на рис. 3.

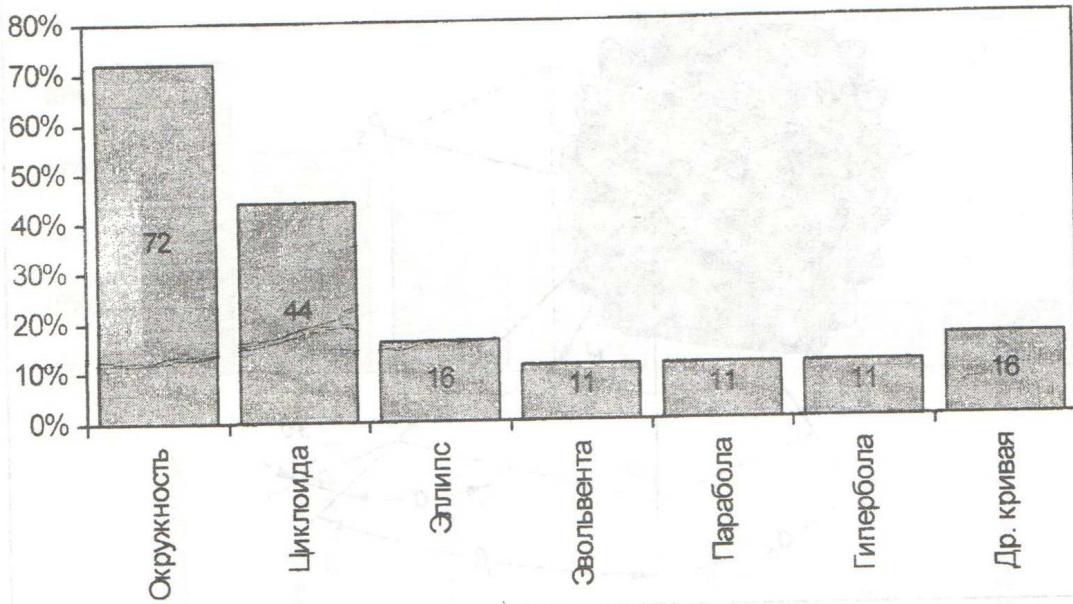


Рис. 3 – Распределение используемых кривых в патентах

Как следует из данного рисунка, в основном используются традиционные для профилирования роторов винтовых компрессоров кривые: окружности и циклоиды. Однако используются и другие кривые, что объясняется широким распространением численных методов и, следовательно, более легкой обработкой сложных кривых, чем это было раньше.

Для анализа методов профилирования роторов винтовых компрессоров был проведен анализ статей.

В статье [3] показан алгоритм расчета распределения зазоров в зацеплении между роторами и проведен анализ данного распределения (рис. 4).

Подобный анализ, но с учетом погрешностей сборки и тепловых деформаций был проведен и в статье [4].

Помимо анализа распределения зазоров при профилировании роторов также исследуется линия зацепления роторов. Данный вопрос освещен в статьях [5, 6, 7].

Из приведенного анализа можно выделить, что при проектировании профилей большое внимание в мире уделяется улучшению передачи крутящего момента. Для этого в местах контакта профилей стараются увеличить угол давления.

Кроме того, при проектировании профилей винтовых компрессоров и самих винтовых компрессоров во всем мире применяют методики расчета распределения зазора между роторами, что позволяет еще на стадии проектирования оценить энергетиче-

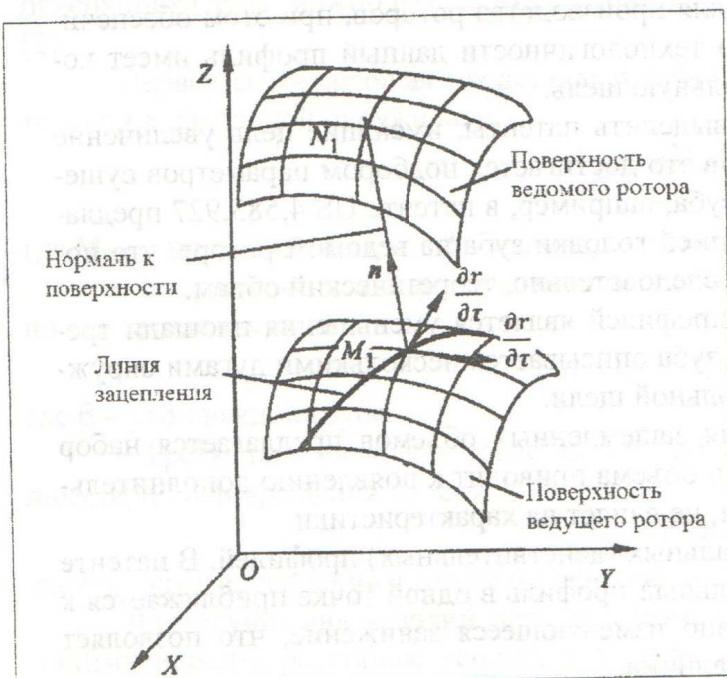


Рис. 4 – Результаты расчета распределения зазоров в зацеплении роторов винтовых компрессоров

ские показатели компрессора. Подобные методики, разработанные в ЗАО «НИИтурбокомпрессор», описаны в статьях [8] и [9], а также в статье [10].

Литература

- 1 Амосов, П.Е. Винтовые компрессорные машины. Справочник / П. Е. Амосов, Н. И. Бобриков, А. И. Шварц, А. Л. Верный – Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1977 – 256 с. : ил.
- 2 Эйдинов, М.С. Расчет зубчатых и червячных передач/ М.С. Эйдинов. – Свердловск: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. – 216 с.
- 3 Xiong, Wei. Calculation to Inter-Lobe Clearance Distribution of Twin-Screw Compressor // Xi'an jiaotong daxue xuebao=J. Xi'an Jiaotong Univ. 2004. 38, № 7, С. 682-685, 6 ил. Библ. 5. Кит.; рез. англ.
- 4 Fujiwara, Mitsuru. Analysis of Internal Clearance of Oil-Free Screw Compressor and Its Application to Performance Simulation // Nihon kikai gakkai ronbunshu. B =Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B. –1992. – 58, № 553.– С. 2765-2771.–Яп.;рез. англ.
- 5 Stosic, N. Rotor interference as a criterion for screw compressor design/ Stosic, N., Smith I. K., Kovacevic A // City University, London. J. End. Des. 2003. 14, №2, С. 209-220.
- 6 Zaytsev, D. Profile generation method for twin screw compressor rotors based on the meshing line/ Zaytsev D., Infante Ferreira C. A./ Int. J. Refrig. 2005. 28, №5, С. 744-755, 13 ил., 2 табл. Библ. 13. Англ.
- 7 Mori, Hidetomo. Variational analysis of screw-rotor profiles with the shortest seal line between rotors // Nihon kikai gakkai ronbunshu. C=Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C. 2001. 67, № 653, С. 217-224, 16 ил. Библ. 6. Яп; рез. англ.
- 8 Якупов, Р.Р. Расчетная модель определения величин профильных зазоров в роторах винтовых компрессоров / Р. Р. Якупов, В. Н. Налимов, И. Г. Хисамеев // Труды XIV Международной научно-технической конференции по компрессорной технике. Том I / ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа». – Казань: Изд-во «Слово», 2007. – 444 с.
- 9 Якупов, Р.Р. К определению профильных зазоров в роторах винтовых компрессоров / Р. Р. Якупов, В. Н. Налимов, И. Г. Хисамеев // Проектирование и исследование компрессорных машин: Сб. науч. трудов под ред. докт. техн. наук, проф., чл.-корр. АН РТ И. Г. Хисамеева, вып.6/ ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», Казань, 2009. – 422 с.
- 10 Мустафин, Т.Н. Расчет окружного профиля героторного компрессора/ Т.Н. Мустафин, Г.Н. Чекушкин, М.С. Хамидуллин// Вестник Казан.технолог.ун-та. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 41-43.

© И. Г. Хисамеев – д-р техн. наук, проф., зав. каф. холодильной техники и технологии КНИТУ;
Р. Р. Якупов - асс. каф. холодильной техники и технологии КНИТУ; В. Н. Налимов - ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», niitk@kazan.ru.