

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ ВНЕШНЕГО СЖАТИЯ

И. А. Малин, А. В. Бурмистров, А. А. Райков, С. И. Саликеев

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается влияние на рабочий процесс профиля роторов двухроторного насоса типа Рутс с различным числом лопастей. В качестве прототипа использован серийно выпускаемый насос НВД-200 с профилем на базе эллиптической кривой. Были рассмотрены конструкции с двух, трех и четырехлопастным профилем. Проведены расчеты основных параметров, характеризующих качество профиля: коэффициента использования объема и проводимости зазоров роторного механизма в молекулярном режиме. Исследовано влияние «полноты» ротора на откачные характеристики насоса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ДВУХРОТОРНЫЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС, ПРОФИЛИ РОТОРОВ, БЕЗМАСЛЯНЫЙ ВАКУУМ, ОТКАЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, БЫСТРОТА ДЕЙСТВИЯ, ОБРАТНЫЕ ПЕРЕТЕКАНИЯ, МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ АГРЕГАТ

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ROOTS-TYPE MULTILOBE VACUUM PUMPS

I. A. Malin, A. A. Raykov, A. V. Burmistrov, S. I. Salikeev

ABSTRACT

Influence of rotor profile with different number of lobes on Roots vacuum pump working process is considered. Production vacuum pump NVD-200 with profile on the basis of elliptical curve was used as a prototype. Design with two lobe, three lobe and four lobe rotor profiles was considered. Calculation of the main parameters characterizing profile quality (volume use coefficient and conductance of rotor mechanism clearances in molecular flow regime) was carried out. Influence of rotor “fullness” on pumping characteristics was studied.

KEYWORDS

ROOTS VACUUM PUMP, ROTORS PROFILE, OIL-FREE VACUUM, PUMPING CHARACTERISTICS, PUMPING SPEED, BACKFLOW, MULTISTAGE UNIT

ВВЕДЕНИЕ

Насос вакуумный двухроторный (НВД) типа Рутс (рис. 1) представляет собой механический вращательный вакуумный насос внешнего сжатия, рабочая камера в котором образуется корпусом и профильными прямозубыми роторами, синхронно вращающимися в противоположных направлениях с гарантированными зазорами. НВД называют также насосом Рутса и бустерным вакуумным насосом. Он сочетает в себе высокую производительность, надежность, компактность и простоту конструкции. Особенности данного насоса делают его востребованным в нефтепереработке, металлургии, химической, строительной, фармацевтической, пищевой промышленности [1]. В качестве газодувки машины Рутса используются для пневмотранспорта, аэрации бассейнов, систем сепарации и вентиляции.

Отсутствие смазывающей жидкости в рабочем объеме, а следовательно, и обратного потока паров позволяет использовать ступени Рутса при создании средств получения безмасляного вакуума, а исключение внутреннего сжатия, при соответствующем охлаждении, позволяет применять двухроторный насос при откачке взрывоопасных газов.

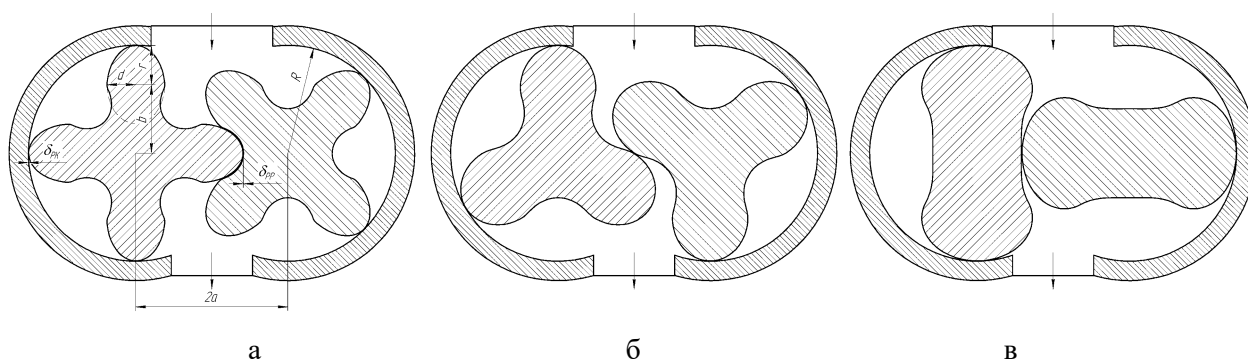


Рис. 1. НВД четырех (а), трех (б) и двухлопастковыми (в) роторами

Вместе с тем, отсутствие внутреннего сжатия приводит к повышенному энергопотреблению и нагреву, а наличие гарантированных зазоров увеличивает обратные перетекания и повышает остаточное давление, особенно при работе с выхлопом в атмосферу. Также на энергоэффективность рабочего процесса оказывает сильное влияние наличие завихрений в области выходного тракта и пульсации давления на выхлопе. Пульсации также приводят к вибрации, а значит к снижению долговечности подшипников и шуму.

На характеристики двухроторного насоса оказывает влияние множество факторов.

Важнейшими из них являются величина отсеченного объема и проводимость каналов роторного механизма, которые, в первую очередь, зависят от профиля роторов. Наиболее распространенным для НВД традиционно являлся двухлопастной профиль (рис. 1 в). Он проще и дешевле в изготовлении, обеспечивает высокий коэффициент использования рабочего объема и хорошо сбалансирован.

Вместе с тем, в связи с повсеместным внедрением высокоточных станков с ЧПУ появились возможности серийно изготавливать 3-х и 4-х лопастные ротора (рис.1 а, б) и, тем самым, расширить сферу применения машин внешнего сжатия. Данная тенденция нашла свое отражение в разработанных в последнее десятилетие безмасляных многоступенчатых агрегатах на базе 4-х лопастных роторов [2]. В России подобные машины не разрабатывались и не выпускались, хотя потребность в них, особенно с учетом программ развития отечественного приборостроения и микроэлектроники, очень высокая.

В классической учебной литературе по вакуумной технике [3] указывается, что с технологической точки зрения наиболее интересны ротора со следующими геометрическими параметрами: для 2-х лопастных $R/A=0,883$, $b/a=0,5$; для 3-лопастных - $R/A=0,759$, $b/a=0,5$, где $a=A/2$ половина межосевого расстояния, b – расстояние от оси до центра эллипса.

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСА

Рассмотрим в настоящей работе достоинства и недостатки 2-х, 3-х и 4-х лопастных роторов и проведем их сопоставления по основным рабочим характеристикам.

Возьмем за базовый вариант насос НВД-200, серийно выпускаемый АО «Вакууммаш» (г. Казань) и имеющий геометрическую быстроту действия 97 л/с при 50 об/с. Сохранив межцентровое расстояние $2a=75$ мм, можно будет в дальнейшем использовать практически все детали (шестерни, подшипники) для создания опытного образца, что позволит проводить валидацию полученных данных.

Влияние профиля роторов на откачные характеристики можно оценить через коэффициент использования отсеченного объема $\chi = 1 - f_R/(\pi R^2)$ (где f_R – площадь поперечного сечения ротора, R – радиус расточки корпуса) и проводимость каналов к роторного механизма. На рис. 2 представлены зависимости χ для роторов с различным числом лопастей от отношения радиуса расточки корпуса к межосевому расстоянию при отношении $b/a=0.8$, определяющем полноту ротора.

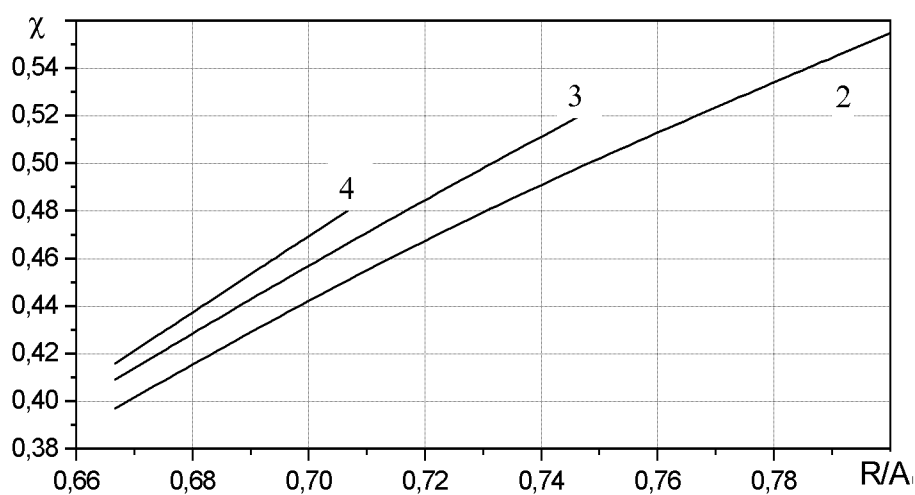


Рис. 2. Коэффициенты использования отсеченного объема для 2, 3, 4-х лопастного профилей

Как видно из графика, при одинаковых размерах корпуса четырехлопастной профиль обеспечивает больший, по сравнению с двух и трехлопастным профилями, коэффициент использования объема за счет меньшей полноты ротора (рис.3). Увеличение радиуса расточки корпуса приводит к росту χ , однако при $R/A > 0,707$ для четырехлопастного и $R/A > 0,747$ для трехлопастного, существование сопряженных профилей невозможно. В итоге, при росте радиуса расточки корпуса максимальный коэффициент использования объема способен обеспечить классический двухлопастной ротор.

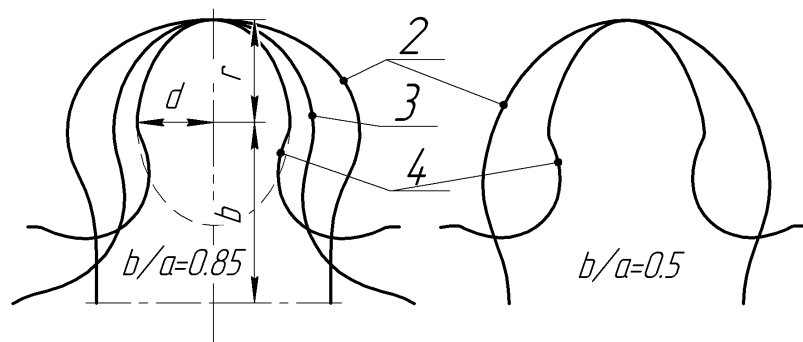


Рис. 3. Сравнение «полноты» 2, 3, 4-х лопастных профилей при разных отношениях b/a

Расчет проводимости каналов роторного механизма проводился по методикам, представленным в работах [4, 5].

Для сравнительной оценки величины обратных перетеканий удобно воспользоваться проводимостью каналов при молекулярном режиме, поскольку для этого параметра разработаны надежные методы расчета [6]. На рис. 4 показана зависимость проводимости насоса от угла поворота роторов. Следует отметить, что зависимость проводимости симметрична относительно 45 градусов для двухлопастного, 30 – для трехлопастного и 22,5 – для четырехлопастного роторов. Средняя проводимость составляет 1,406 л/с, 1,401 л/с, 1,274 л/с для 4, 3, 2-х лопастных роторов соответственно.

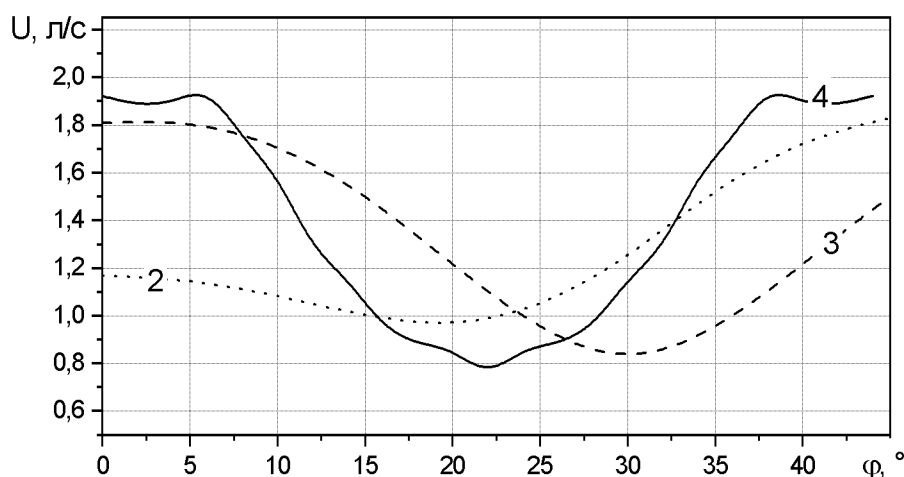


Рис. 4. Проводимость роторного механизма при $b/a=0.8$ при различном числе лопастей

Полученные результаты не позволяют сделать однозначного вывода о преимуществах того или иного многолопастного профиля. Так увеличение коэффициента использования объема достигается за счет уменьшения «полноты» ротора. Именно поэтому, в нашем случае 4-х лопастной ротор имеет больший коэффициент, но этот же ротор имеет худшую «герметичность» (большие перетекания). При других параметрах корпуса 4-х лопастной ротор может иметь меньшие перетекания, особенно с учетом наличия большего количества промежуточных полостей между входом и выходом.

Таким образом, выбор типа ротора и его геометрических параметров следует проводить с учетом требуемых быстроты действия, степени повышения давления, уровня шума и пульсаций. Поэтому параметры профиля являются предметом оптимизации. Пример такой оптимизации показан на рис. 5.

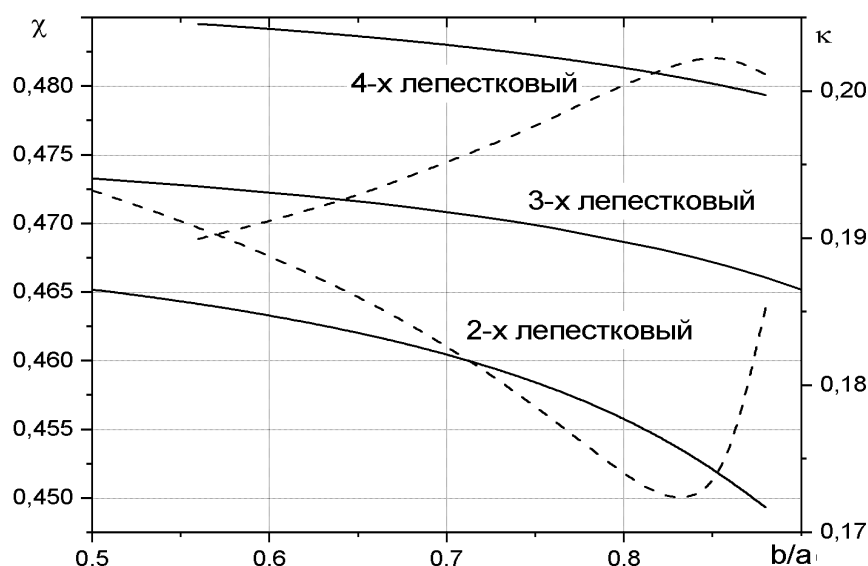


Рис. 5. Коэффициенты использования отсеченного объема (сплошная) и проводимости межроторного канала (пунктир)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проводимость роторного механизма также зависит от размеров насоса и путем регулирования полноты профиля возможна ее минимизация для различного числа лопастей. Так в работах [7, 8] предложены параметры эллиптического профиля с двумя лопастями, обеспечивающими максимальный коэффициент использования объема при минимальной проводимости каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хаблянян М.Х. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.1. Инженерно-физические основы: учеб. пособие / М.Х. Хаблянян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. – 237 с.
2. Xing L, Feng J, Tang H, Peng X. Performance improvement of a large capacity Roots blower based on profile modification. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2021;235(13):2386-2394.
3. Механические вакуумные насосы / Е. С. Фролов, И. В. Автономова, В. И. Васильев и др. – М. : Машиностроение, 1989. – 288 с.
4. Salikeev S. Non-contact vacuum pumps. A general-purpose method for conductance calculation of profile slot channels / S. Salikeev, A. Burmistrov, M. Bronshtein, M. Fomina // *Vakuum in Forschung und Praxis*. - 2014. - Vol. 26. - Is. 1. – P. 40-44.
5. Burmistrov, A. Conductance Calculation of Slot Channels with Variable Cross Section in Molecular–Viscous Flow Regime / A. Burmistrov, S. Salikeev, M. Bronshtein, M. Fomina, A. Raykov // *Vakuum in Forschung und Praxis*. - 2015. - Vol. 27. - Is. 1. – P. 36-40.
6. Salikeev S. Conductance of slot channels formed by cylindrical walls : Monte Carlo calculations and experimental studies in the molecular gas flow regime / S. Salikeev, A. Burmistrov, M. Bronshtein, M. Fomina // *Vakuum in Forschung und Praxis*. - 2013. - Vol. 25. - Is. 4. – P.34-38.
7. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г. Влияние геометрических параметров окружного профиля на характеристики двухроторного вакуумного насоса типа Рутс // *Компрессорная техника и пневматика*. – 2003.- № 5. - С. 22-25.

8. Патент № 2730769 Российская федерация, МПК F04C 25/02 (2020.02); F04C 18/126 (2020.02). Двухроторная машина: №2020107745: заявл. 19.02.2020: опубл. 25.08.2020 / Исаев А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Райков А.А., Бронштейн М.Д., Капустин Е.Н.; заявитель и патентообладатель АО «Вакууммаш» Бюл. № 24 – 10 с. : ил. - Текст: непосредственный.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Малин Илья Александрович — аспирант «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: hoyki550@gmail.com.

Райков Алексей Александрович (ORCID: 0000-0001-5495-7834) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: alraykov@kstu.ru.

Бурмистров Алексей Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: burm@kstu.ru.

Саликеев Сергей Иванович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: salikeev_s@mail.ru.