

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО НАСОСА ТИПА РУТС С ТРЕХЛЕПЕСТКОВЫМ ПРОФИЛЕМ РОТОРОВ

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

АННОТАЦИЯ

Двухроторные вакуумные насосы типа Рутс (ДВН) широко используются для получения безмасляного вакуума, однако для работы требуют агрегатирования с форвакуумными насосами. Многоступенчатая конструкция из нескольких последовательно соединенных ступеней позволяет решить эту проблему. В таких насосах используются различные профили роторов с двумя, тремя или четырьмя лопастями. В данной работе проводится расчетное исследование трехлепесткового эллиптического профиля, используемого в качестве последней ступени, то есть при выходном давлении, равном атмосферному. Моделирование проводится в CFD пакете Ansys CFX при различных входных давлениях и частотах вращения роторов. Структурированная расчетная сетка создается в пакете TwinMesh. По результатам расчета построены индикаторные диаграммы рабочего процесса и зависимости быстроты действия. Проанализированы пульсации давлений и расхода на выходе. Проведено сравнение характеристик двух, трех и четырех – лепестковых насосов. Полученные данные будут использоваться при разработке отечественных многоступенчатых агрегатов на базе ДВН типа Рутс.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ДВН ТИПА РУТС, CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНДИКАТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ, ОТКАЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ АГРЕГАТ

CHARACTERISTICS CALCULATION OF THREE-LOBE ROOTS VACUUM PUMP

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

ABSTRACT

Roots vacuum pumps are widely used for obtaining of oil free vacuum, but they need aggregate design with forepumps. Multistage design consisting of several serial stages makes it possible to solve this problem. In such pumps different rotor profiles with two, three or four lobes are used.

In this work calculation study of three lobe elliptical profile used as the last stage (i.e. at outlet atmospheric pressure) is carried out. Modeling is carried out with the help of CFD software ANSYS CFX at different inlet pressures and rotors rotary speed. Structured calculation mesh is created in TwinMesh software.

Indicator diagrams of working process and pumping speed relationship were plotted by calculation results. Pressure pulsation and flow rate at the outlet were analyzed. Comparison of pumps characteristics with two, three or four lobes was carried out. The obtained data will be used for design of multistage units with Roots pump as the base.

KEYWORDS

ROOTS PUMP, CFD MODELING, INDICATOR DIAGRAMS, PUMPING CHARACTERISTICS, MULTISTAGE UNIT

ВВЕДЕНИЕ

Двухроторные вакуумные насосы типа Рутс (ДВН) почти два века используются в технологических процессах, требующих высокой скорости откачки [1, 2], а именно, в нефтепереработке, металлургии, химической, фармацевтической, пищевой промышленности, в энергетике, процессах нанесения тонких пленок и ряде других. Широкое распространение ДВН, помимо высокой производительности, объясняется отсутствием рабочей жидкости в рабочем объеме, высокой надежностью и возможностью откачивать парогазовые и запыленные среды.

Самым существенным недостатком ДВН является невысокая степень повышения давления за счет перетеканий газа с выхода на вход через зазоры роторного механизма. Именно поэтому ДВНы практически всегда эксплуатируются с форвакуумными насосами. В агрегате с вакуумным насосом с масляным уплотнением ДВН способен обеспечить давление до 0,01 Па.

Однако использование масляного форвакуумного насоса сводит на нет преимущества ДВН по получению безмасляного вакуума. Поэтому в качестве ФВН могут использоваться винтовые или спиральные насосы [3, 4]. Уже в XXI веке появились многоступенчатые агрегаты с несколькими последовательно соединенными ступенями ДВН (до 5-6) [5]. Причем в подобных агрегатах используются ротора с 3х и 4х лепестковым профилем роторов. В России подобные машины не выпускаются. Поэтому рассмотрим в настоящей статье работу ДВН типа Рутс с трехлепестковым профилем роторов при различных давлениях на выходе.

Известно, что характеристики любого бесконтактного насоса зависят от величины обратных перетеканий через каналы роторного механизма [6], на которые в первую очередь влияние оказывает профиль роторов. Поэтому большое количество работ по ДВН посвящены поиску профилей роторов, обеспечивающих минимизацию перетеканий. Так в [7] предложен профиль ротора, состоящий из пяти дуг, что позволило получить улучшенную герметизацию благодаря более длинному и узкому зазору. В работе [8] разработан новый ротор с тремя лопастями для воздуходувки Рутса с поперечным сечением, выполненным в виде комбинации вогнутой дуги, выпуклой дуги и циклоидальных кривых. Хванг [9] предложил новый профиль ротора с переменным трохоидальным отношением, и исследовал, как добиться снижения перетеканий и увеличения коэффициента подачи. В работе [10] описано построение профиля, основанного на эллиптической линии зацепления, и проведено сравнение характеристик насоса при различных параметрах эллипса.

В настоящей работе проведен анализ трехлепесткового эллиптического профиля, обеспечивающего большую свободу выбора формы за счет независимого задания нескольких геометрических размеров [11]. При этом для дальнейшей возможности экспериментальной проверки полученных расчетных данных было решено опытный образец создавать на базе серийно выпускаемого АО «Вакууммаш» (г.Казань) насоса вакуумного двухроторного НВД-200. Сохранение межцентрового расстояния $A=75$ мм позволяет использовать кинематические узлы серийного насоса и упростить задачу. Разрез исследуемого насоса представлен на рис.1. При расчете межроторный зазор задавался равным 0,3 мм, радиальные – 0,15 мм.

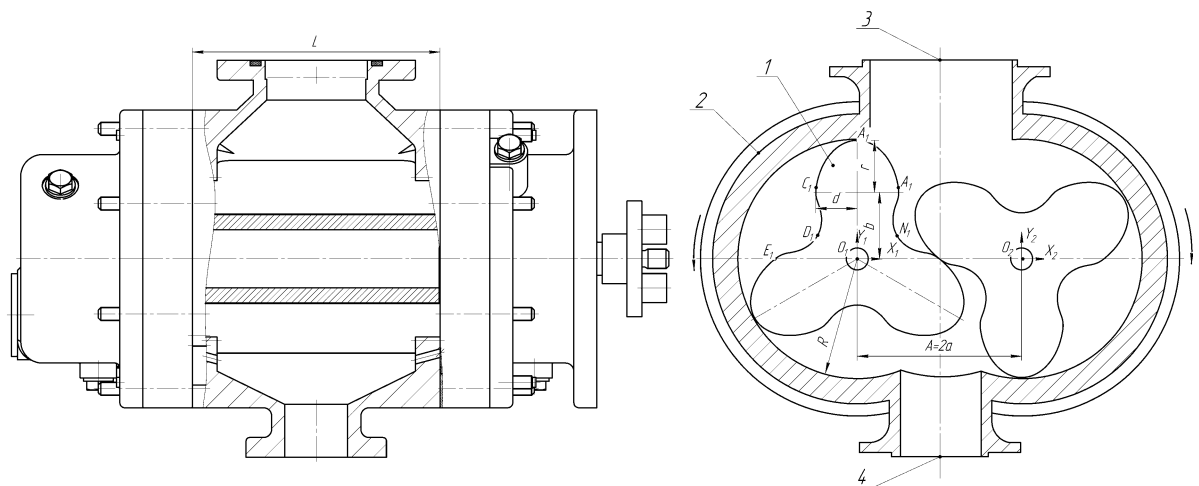


Рис. 1. Разрез исследуемого ДВН с трехлепестковым профилем роторов: 1 – ротор, 2 – корпус, 3 – вход, 4 – выход

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для расчета выбрана методика CFD моделирования, которая обеспечивает наибольшую точность описания рабочего процесса.

В качестве расчетного использован внутренний объем насоса начиная от входного сечения всасывающего патрубка, включая объем внутри расточки корпуса за вычетом роторов и внутреннее пространство выходного патрубка. Для ускорения расчета модель рассматривается в двухмерной постановке. В работе [12] доказана незначительность влияния на результат такого упрощения.

Структурированная сетка внутреннего объема насоса создается в программе TwinMesh [13]. Форма рабочих полостей повторяется каждые 120 градусов, поэтому расчетная сетка генерируется в диапазоне от 0 до 120 градусов с шагом 0,3 градуса. Вблизи стенок роторов и расточки корпуса используется сгущение сетки для более точного описания пристеночных слоев. Итоговая сетка состоит из 14 000 гексаэдральных элементов (рис. 2). Угол скошенности элементов сетки не ниже 25 градусов.

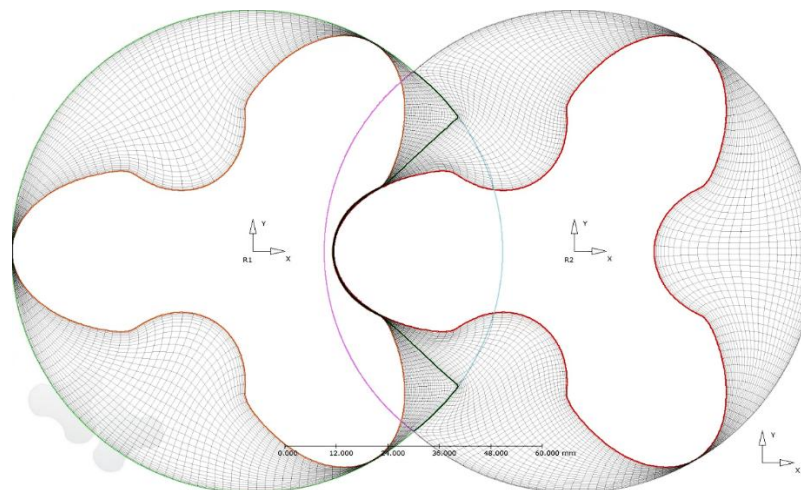


Рис. 2. Сетка рабочей области трехлепесткового ДВН

Сетка статора, объединяющая в себе внутренние объемы входного и выходного трактов, создается в ANSYS Meshing и не меняется от положения ротора. Созданная сетка

состоит из 1 000 неструктурированных гексаэдральных элементов (рис.3). Передача параметров сетки от статического к динамическому объему осуществляется через интерфейсы, расположенные на соответствующих границах.

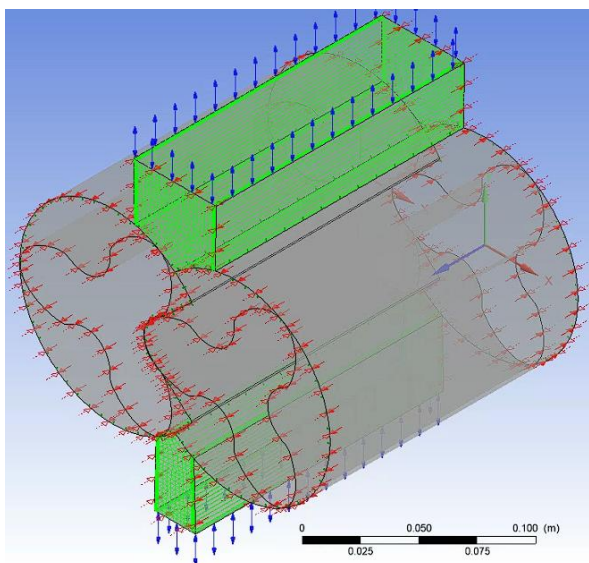


Рис. 3. Итоговая сетка с указанием граничных условий

В качестве рабочего тела рассматривается воздух в модели сжимаемого идеального газа. Для расчета используется SST-модель турбулентности, которая представляет собой комбинацию $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ моделей турбулентности [14]. Для повышения точности расчета используется опция «Laminar Turbulent Blend», основанная на уравнениях ω -модели.

На входе и выходе задается открытое граничное условие (Opening) с соответствующей опцией массы и импульса и нулевым градиентом турбулентности. На поверхности роторов задается соответствующая угловая скорость вращения. На стенках корпуса – условие отсутствия скольжения, и теплообмена. На интерфейсах между рабочей областью и патрубками всасывания и нагнетания задаются условия сохранения массы и импульса, турбулентности, теплового потока. На торцевых поверхностях установлено условие симметрии.

Расчет ведется в нестационарной постановке. Сходимость контролируется по разности усредненного за один оборот массового расхода во входном и выходном трактах. В зависимости от величины входного давления сходимость достигается за 5-10 оборотов ротора. В результате решения находятся распределения давления, скоростей и температур по рабочей полости насоса. Также измеряются массовые расходы, моменты силы, возникающие под воздействием газовых сил, и индикаторная мощность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 показаны поля скоростей в трехлепестковом насосе при входном давлении 50 кПа и выходном – 100 кПа. Во входном участке видно поступление газа в образующуюся отсеченную полость. В отсеченном объеме справа наблюдается появление кольцевого завихрения обусловленного взаимодействием газа с неподвижной стенкой. В нижней части насоса при объединение отсеченной полости с объемом выхлопа происходит резкий напуск газа в эту полость со скоростью до 300 м/с. Также заметно значительное ускорение газа в межроторном зазоре в двух точках с наименьшей величиной зазора.

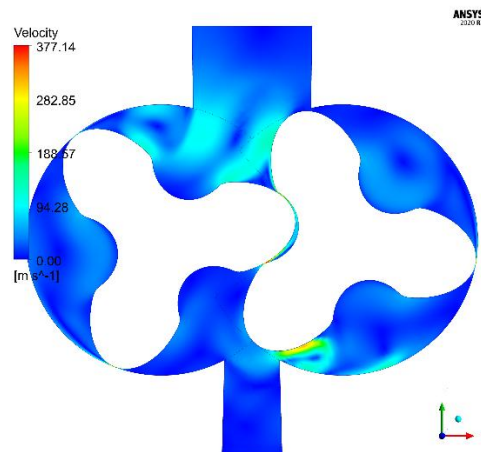


Рис. 4. Поля скоростей в трехлепестковом насосе.

Для построения индикаторных диаграмм рабочего процесса проводится измерение давления в нескольких точках рабочего объема, причем выбор точки измерения определяется положением роторов. Градиент давления во входном тракте и отсеченной полости незначителен, однако на выходе может достигать 4 кПа. Итоговые индикаторные диаграммы для разных входных давлений представлены на рис. 5.

На выходном участке индикаторной диаграммы наблюдаются пульсации амплитудой до 13 кПа, причем их величина снижается при снижении перепада давлений между входом и выходом.

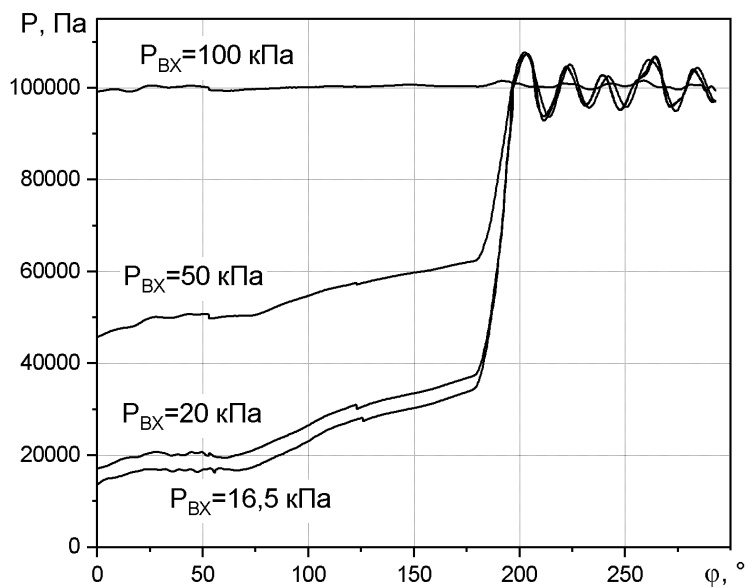


Рис. 5. Индикаторные диаграммы при различных входных давлениях

Зависимости быстроты действия от входного давления для двух и трехлепесткового профиля представлены на рис. 6.

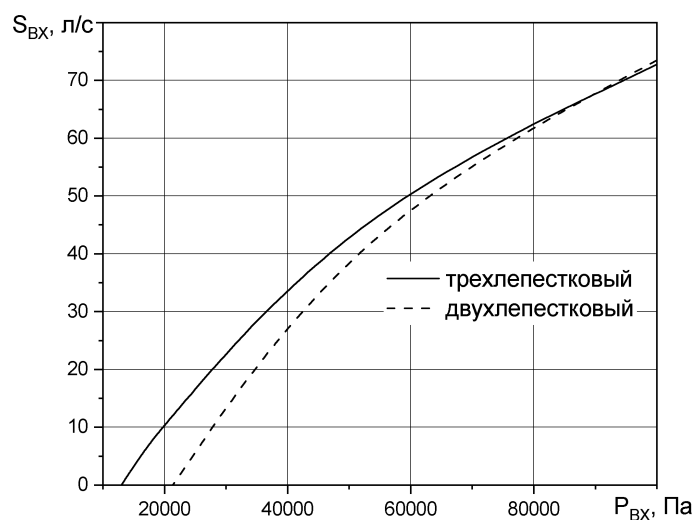


Рис. 6. Зависимость скорости действия от входного давления для двух- и трехлепесткового профиля роторов ДВН

Из графика видно, что за счет меньших перетеканий газа с выхода на вход трехлепестковый насос по сравнению с двухлепестковым обеспечивает большую скорость действия и меньшее базовое давление. Остаточное давление для трехлепесткового насоса с выхлопом в атмосферу составляет 13 кПа, для двухлепесткового – 21,7 кПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет оценить характер протекающих в рабочей полости ДВН процессов. Кривая скорости действия показывает преимущество трехлепесткового профиля над двухлепестковым при работе с выхлопом в атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хаблянян М.Х. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.2. Вакуумные насосы: учеб. пособие / М.Х. Хаблянян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. - 300 с.
2. Бурмистров А.В. Двухроторные вакуумные насосы типа Рутс / А.В. Бурмистров, А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.А. Исаев. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2021. - 84 с.
3. Mustafin, T.N. Analysis of the screw compressor rotors' non-uniform thermal field effect on transmission error / T.N. Mustafin, R.R. Yakupov, A.V. Burmistrov, M.S. Khamidullin, I.G. Khisameev // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2015. doi:10.1088/1757-899X/90/1/012004.
4. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис...докт.техн.наук / А. В. Бурмистров; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. - 363с.
5. Multi-Stage Roots Vacuum Pump [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://showcase.ulvac.co.jp/en/how-to/product-knowledge02/dry-pump.html>
6. Саликеев, С.И. Единый подход к расчету откачных характеристик бесконтактных безмасляных вакуумных насосов / С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, А.А. Райков// Компрессорная техника и пневматика. - 2013, – № 4. - С.37-42.
7. Wang P Y, Fong Z H, Fang H S. 2002, Design constraints of five-arc Roots vacuum blowers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C, 216(2): pp. 225-234.

8. Yao L, Ye Z, Dai J S, 2005, et al. Geometric analysis and tooth profiling of a three-lobe helical rotor of the Roots blower. *Journal of Materials Processing Technology*, 170(1–2): pp. 259- 267.
9. Hwang Y W, Hsieh C F. 2006, Study on high volumetric efficiency of the Roots rotor profile with variable trochoid ratio. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 220(9): pp. 1375-1384.
10. Hsieh C F. 2015, A new curve for application to the rotor profile of rotary lobe blowers. *Mechanism & Machine Theory*, 87: pp. 70-81.
11. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Влияние геометрических параметров эллиптического профиля на характеристики двухроторных вакуумных насосов типа Рутс // *Компрессорная техника и пневматика*. – 2004. - № 6. - С. 38-40.
12. Burmistrov A., Raykov A., Isaev A., Salikeev S., Kapustin E., Fomina M. Efficiency improvement of Roots vacuum pump working process. *Computational fluid dynamics methods modeling. Vakuuum in Forschung und Praxis*. – № 34(3), 2022, pp. 32-37.
13. TwinMesh CFX Berlin license file for Kazan National Research Technological University c/n 13449.
14. Florian MENTER, J. C. FERREIRA, T. ESCH, B. KONNO, “The SST Turbulence Model with Improved Wall Treatment for Heat Transfer Predictions in Gas Turbines”, *Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003 Tokyo November 2-7, 2003*.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Малин Илья Александрович – магистр кафедры «Холодильная техника и технология». Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. 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 г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: alraykov@kstu.ru.

Бурмистров Алексей Васильевич (ORCID: 0000-0001-8612-540X) – доктор технических наук, профессор кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: burm@kstu.ru).

Саликеев Сергей Иванович (ORCID: 0000-0002-2007-4635) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: salikeev_s@mail.ru).