

ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ГАЗА В ОТСЕЧЕННОМ ОБЪЕМЕ НА РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХРОТОРНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ ВНЕШНЕГО СЖАТИЯ

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

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается рабочий процесс двухроторного вакуумного насоса внешнего сжатия типа Рутс. С помощью камерной модели рассчитаны быстрота действия и максимальное отношение давлений НВД-200 с роторами на базе эллиптической кривой. Полученные зависимости сопоставлены с результатами CFD расчета и экспериментальными данными. Показано, что принятое в камерной модели допущение о равномерности параметров газа в пределах каждой камеры, не оказывает практически значимого влияния на расчетные откачные характеристики насоса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ДВУХРОТОРНЫЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС, БЫСТРОТА ДЕЙСТВИЯ, МАКСИМАЛЬНОЕ ОТНОШЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ, ПРОФИЛЬ РОТОРОВ, БЕЗМАСЛЯНЫЙ ВАКУУМ, ОТКАЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, КАМЕРНАЯ МОДЕЛЬ, CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ

INFLUENCE OF GAS PARAMETERS IRREGULARITY IN A CUT-OFF VOLUME ON CHARACTERISTICS CALCULATION OF ROOTS PUMPS WITH EXTERNAL COMPRESSION

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

ABSTRACT

In this work working process of Roots pump with external compression is considered. Pumping speed and maximal pressure ratio of NVD-200 with elliptical curve rotor profile are calculated with the help of chamber model. The obtained relationships are compared with the results of CFD solution and experimental data. It is shown that accepted in the chamber model assumption concerning uniformity of gas parameters within each chamber does not influence pumping characteristics significantly.

KEYWORDS

ROOTS PUMP, PUMPING SPEED, MAXIMAL PRESSURE RATIO, ROTOR PROFILE, OIL FREE VACUUM, PUMPING CHARACTERISTICS, CHAMBER MODEL, CFD MODELING

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых высокоэффективных вакуумных насосов невозможно без предварительного математического моделирования их рабочих процессов. В ситуации, когда характеристики насоса зависят от целого ряда конструктивных параметров, проводить оптимизацию конструкции можно только на матмодели, а попытки доводки конструкции на опытных образцах приводят к неоправданным затратам времени и средств. Данное утверждение в полной мере относится к бесконтактным безмасляным вакуумным насосам [1, 2], как к наиболее высокотехнологичным средствам откачки, требующим прецизионного изготовления их роторных механизмов.

Наиболее широкое распространение среди бесконтактных машин получили двухроторные вакуумные насосы типа Рутс [3, 4]. Сложность создания математической модели насоса вакуумного двухроторного (НВД) объясняется, в первую очередь, очень широким диапазоном рабочих давлений – от 10^{-3} до 10^5 Па и, соответственно, разными закономерностями и методами расчета течения газа (от молекулярного до вязкостного течения, включая турбулентный режим).

Одним из самых эффективных методов является моделирование методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD) [5-7], позволяющее находить параметры газа в любой точке газового объема с учетом теплообмена и подвижности стенок. К сожалению, данные подходы работают только в условиях сплошной среды, захватывая небольшой участок окол вязкостного режима. Поэтому разработаны так называемые «камерные» модели рабочего процесса рабочего процесса НВД, в которых для нахождения давления и температуры газа используется система дифференциальных уравнений, а перетекания газа через каналы находятся с использованием формул для различных геометрий и режимов течения. Одним из недостатков данного подхода является допущение о равномерности давления и температуры в пределах выделенного контрольного объема.

Влияние пульсаций газа на выходе в воздухоудувках типа Рутс исследуется в работе [8] при помощи CFD моделирования. Отмечено, что снижение пульсаций снижает выхлопное давление и способствует более стабильной работы, но не оказывает существенного влияния на производительность.

В работе [9] рассмотрено влияние уменьшения пульсаций за счет добавления канавок в корпусе в вакуумном насосе типа Рутс. При этом производительность увеличилась 1,17 %.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В настоящей статье рассмотрим, как влияет неравномерность давления и температуры на интегральные параметры НВД – быстроту действия и отношение давлений выхода и входа. Для этого сопоставим результаты расчета камерной моделью, реализованной для винтовой машины в работе [10], а для НВД – в работе [11], с расчетом CFD моделью, а именно комплексом ANSYS-CFX [12] с использованием метода построения динамических сеток в пакете TwinMesh [13].

В качестве объекта исследования возьмем двухроторный насос с эллиптическим профилем роторов, имеющем следующие основные размеры: межосевое расстояние $A=75$ мм, радиус расточки корпуса $R=60$ мм, параметры эллипса $b/a=0,892$, $r/a=0,705$ ($a=A/2$), экспериментальные характеристики которого получены в работе [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим влияние пульсаций на выходе на точность расчета камерным методом, предполагающим равномерность давления в пределах каждой камеры, путем сравнения индикаторных диаграмм, полученных CFD и камерными методами при $P_{вх}=13332$ Па, $P_{вых}=37089$ Па, $n=3000$ об/мин. На рис.1 представлено распределение давлений в рабочей полости, полученное в результате CFD моделирования. Давления измерялись в отсеченном объеме (точка 1) и на выходе (точка 2). Как видно из рисунка, в целом градиент давления внутри рабочей полости и выходном патрубке небольшой, однако присутствуют скачки давления вблизи роторов, вызванные их движением.

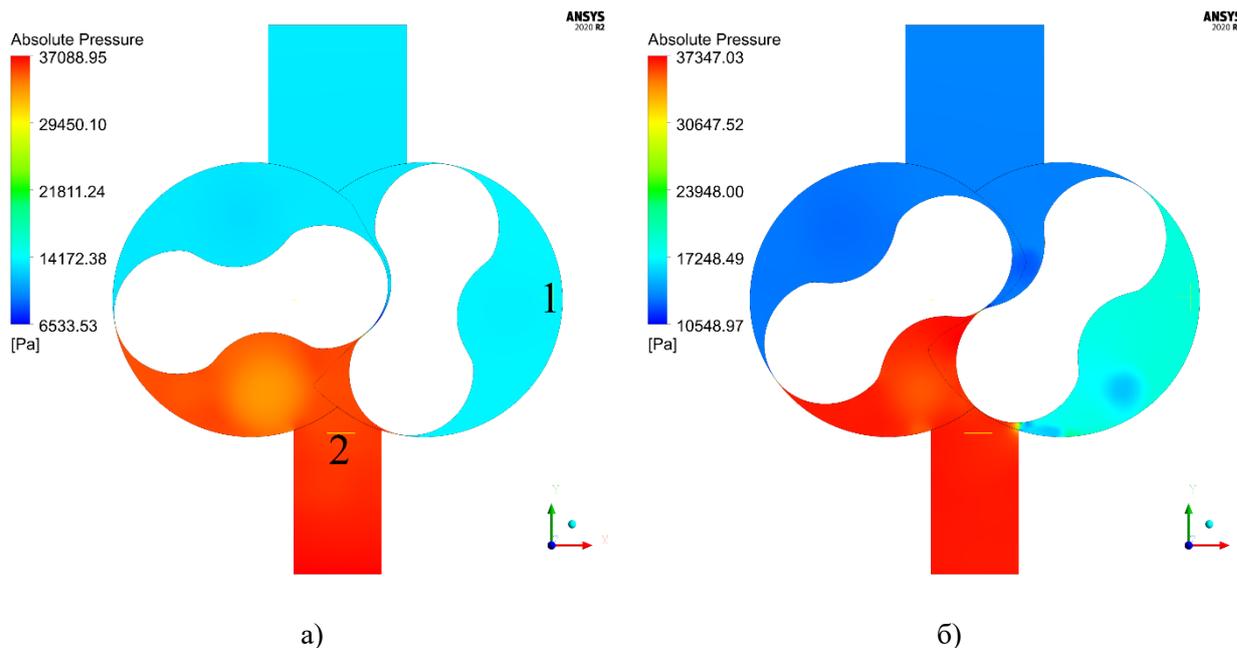


Рис. 1. Распределение давлений в рабочей полости НВД: а – процесс переноса, б – момент выхлопа

График зависимости давления в рабочей полости (точка 1) и на выходе из насоса (точка 2) представлен на рис. 2. Величина пульсаций давления на выходе ($P_{\text{Макс}} - P_{\text{Мин}} / P_{\text{Ср}}$) составляет 14%. При этом усредненная величина давления, полученная при CFD расчете, отличается от результата расчета камерным методом всего на 0,38 %. Так как основной вклад в снижение быстроты действия оказывают перетекания через межроторный зазор, которые зависят от средних давлений в объеме входа и выхода, то влияние пульсаций давления на выходе незначительно.

Максимальная разница давлений в рабочей полости и на выходе составляет 6,7 % и объясняется высоким сопротивлением участка между ротором и корпусом в момент объединения переносного объема с объемом на выходе из-за высокой скорости истечения.

Там же представлена индикаторная диаграмма, полученная моделированием камерным методом, методика которого изложена в работе [14]. Сравнение индикаторных диаграмм показывает хорошую сходимость между CFD и камерным методами на большей части процесса. Отклонение давлений в начале процесса переноса объясняется некоторой неравномерностью давлений в рабочем объеме при CFD расчете. Максимальное отличие давления, полученного CFD методом от результата расчета камерным методом, составляет 12,2%, однако наблюдается на небольшом участке диаграммы и не оказывает значительного влияния на суммарные обратные перетекания через каналы роторного механизма.

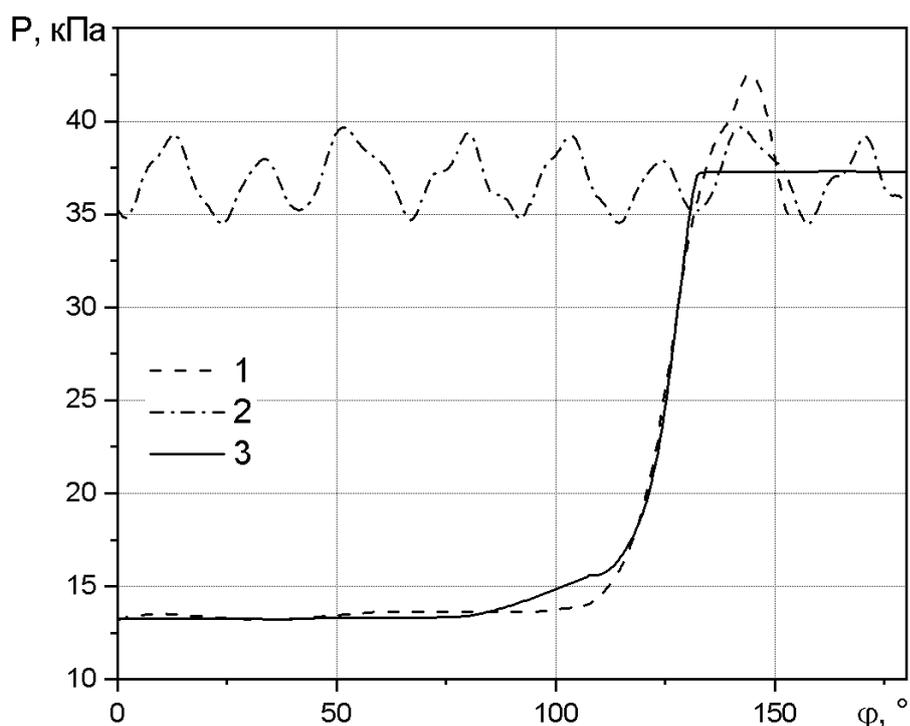


Рис. 2. Зависимость давлений в рабочей полости НВД от угла поворота ротора: 1 – CFD точка 1 (отсеченный объем), 2 – CFD точка 2 (выходной тракт), 3 – расчет камерным методом

Экспериментальные и расчетные кривые быстроты действия НВД при работе с НВСП-35 в качестве форвакуумного насоса представлены на рис. 3. Максимальное отклонение CFD расчета от эксперимента 7%, расчета камерной моделью – 12%. При этом отличие между результатами CFD и камерного моделирования на большей части кривой незначительно.

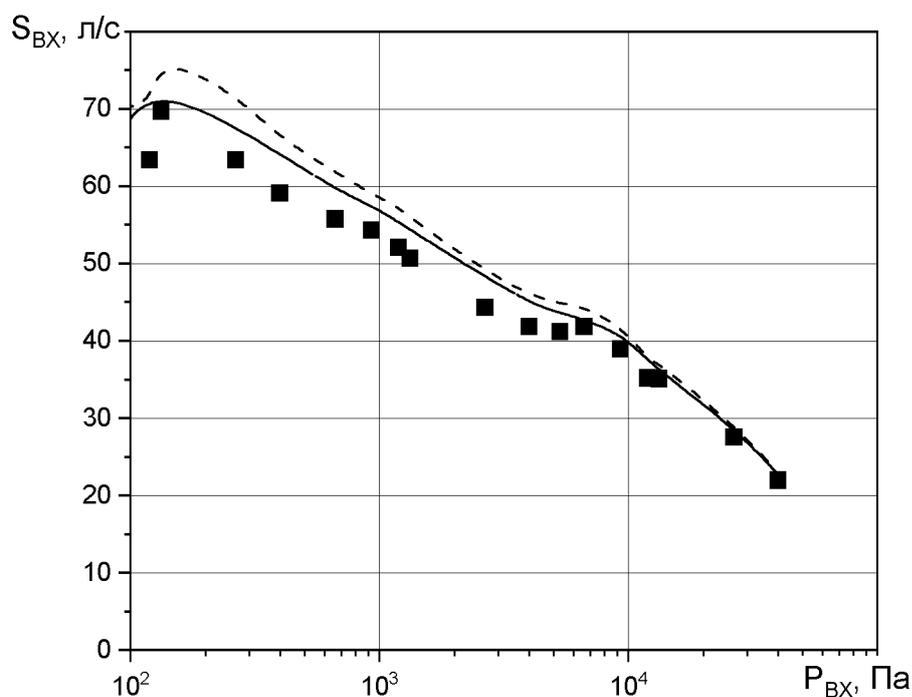


Рис. 3. Зависимость быстроты действия агрегата при частоте вращения 3000 об/мин: точки – эксперимент, сплошная – результат CFD моделирования, пунктир – расчет камерным методом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сравнение индикаторных диаграмм полученных камерным и CFD методом, показывает расхождение не более 12,2%, обусловленных возникновением пульсаций давления на выходе и неравномерностью давления в отсеченном объеме. Однако, несмотря на это разница в интегральной характеристике насоса (быстроте действия), рассчитанной различными методами, незначительна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хаблянян М.Х., Саксаганский Г.Л., Бурмистров А.В. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.2. Вакуумные насосы: учеб. пособие, Изд-во КНИТУ (2016).
2. Hoffman D.M., Singh V., Thomas J.H., eds. Handbook of vacuum science and technology. Academic Press (1998).
3. Фролов Е. С., Автономова И. В., Васильев В. И. и др. Механические вакуумные насосы, Машиностроение (1989).
4. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис...докт.техн.наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана (2006).
5. Raykov A., Burmistrov A., Salikeev S., Isaev A. Working process of Roots vacuum pumps. Development and verification of CFD model, *Vakuum in Forschung und Praxis* 33(3) (2021).
6. Burmistrov A., Raykov A., Isaev A, Salikeev S., Kapustin E., Fomina M. Efficiency improvement of Roots vacuum pump working process *Vakuum in Forschung und Praxis* 34(3) (2022).

7. Tyurin A. V., Burmistrov A. V., Raykov A. A., Salikeev S. I. CFD modelling of working process of scroll vacuum pump, AIP Conference Proceedings 2784, 030025 (2023).
8. Xiangcheng K., Jiquan H., Yi G., Jianmei F., Xueyuan P. Investigation on the pressure fluctuation of hydrogen Roots pump with a novel reflow structure for fuel cell vehicles, International Journal of Hydrogen Energy 50(C) (2024).
9. Xing W, Zhang F, Zhao F, Song J, Zhu X, Tang X. Influence of Different Reflux Groove Structures on the Flow Characteristics of the Roots Pump, Machines 10(11) 2022.
10. Mustafin T.N., Yakupov R.R., Burmistrov A.V., Khamidullin M.S., Khisameev I.G. Analysis of the screw compressor rotors non-uniform thermal field effect on transmission error, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering (2015).
11. Исаев А.А., Бурмистров А.В., Райков А.А., Саликеев С.И. Метод расчета откачных характеристик ДВН типа Рутс, работающих при повышенных давлениях (вязкостный режим течения газа в зазорах), Наноиндустрия 14(6) (2021).
12. Ansys, Inc. license file for Kazan National Research Technology University c/n 657938
13. TwinMesh CFX Berlin license file for Kazan National Research Technological University c/n 13449.
14. Raykov A.A., Salikeev S. I., Burmistrov A.A., Fomina M.G. Non-contact vacuum pumps. A general-purpose model of the working process, Vakuuum in Forschung und Praxis 35(4) (2023).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

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