

## ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС БЕЗМАСЛЯНОГО СПИРАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

### THE EFFECT OF RADIAL CLEARANCE ON THE WORKING PROCESS OF AN OIL-FREE SCROLL VACUUM PUMP

*A.V.Тюрин / tyrin92@mail.ru, A.B. Бурмистров, (ORCID: 0000-0001-8612-540X),  
С.И.Саликеев, А.А.Райков ORCID: 0000-0001-5495-7834*

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

ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань

*Насосы вакуумные спиральные за счет наличия гарантированного зазора между спиральями и малых обратных перетеканий обеспечивают получение безмасляного среднего вакуума. При разработке спиральных насосов определяется минимальная величина радиального зазора, обеспечивающая бесконтактное движение спиралей при любых штатных условиях работы. В работе рассматривается методика расчета величины радиального зазора безмасляного спирального насоса. Газовые силы, действующие на рабочие элементы вакуумного насоса, не приводят к значительным изменениям радиального зазора. Учитывая, что спирали изготавливаются из алюминиевых сплавов, основное влияние на изменение радиального зазора оказывают тепловые деформации спиральных элементов. Это изменение может составлять до 25 %, причем для внешних полостей при работе насоса зазор уменьшается, а для внутренних увеличивается. Для нахождения наиболее точной величины радиального зазора необходимо использовать в качестве величины начального приближения результаты обмеров профильных частей спиральных элементов. Сравнение расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм подтвердило адекватность предлагаемой методики.*

*Ключевые слова: спиральный вакуумный насос, индикаторные диаграммы, радиальный зазор, тепловые деформации.*

*Scroll vacuum pumps, due to the presence of a guaranteed gap between the spirals and small backflows, provide an oil-free medium vacuum. When developing scroll pumps, the minimum value of the radial clearance is determined, which ensures non-contact movement of the spirals under any standard operating conditions. The paper considers a method for calculating the radial clearance of an oil-free scroll pump. The gas forces acting on the working elements of the vacuum pump do not lead to significant changes in the radial clearance. Considering that the spirals are made of aluminum alloys, the main influence on the change in the radial gap is caused by thermal deformations of the spiral elements. This change can be up to 25%, and for external cavities during pump operation, the gap decreases, and for internal ones it increases. To find the most accurate value of the radial gap, it is necessary to use the results of measurements of the profile parts of the spiral elements as the initial approximation value. Comparison of calculated and experimental indicator diagrams confirmed the adequacy of the proposed methodology.*

*Keywords: scroll vacuum pump, indicator diagrams, radial clearance, thermal deformations.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основным преимуществом насоса вакуумного спирального (НВСп) является высокая степень сжатия (до  $10^5$ ) [1, 2] при полном отсутствии масла в рабочих объемах

насоса [3]. Это достигается за счет малого радиального зазора между боковыми поверхностями спиральных элементов и большого количества последовательно соединенных серповидных объемов между входом насоса и его выхлопом, что снижает обратные перетекания в насосе. Величина этого зазора в зависимости от размеров НВСП может варьироваться от 0,05 до 0,2 мм [4]. При этом – радиальный зазор должен быть достаточно большим, чтобы обеспечивать бесконтактное орбитальное движение подвижного спирального элемента при всех штатных условиях работы и в то же время достаточно малым, чтобы перетекания через радиальный канал были минимальными, что обеспечивало бы получение предельного остаточного давления около 1 Па [5].

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Ввиду сильного влияния перетеканий через радиальный канал на откачные характеристики НВСП при оценке адекватности математической модели следует оперировать максимально точной величиной радиального зазора. Для этого необходимо определить, как изменяется радиальный зазор под действием различных факторов. В работах [6, 7] установлено, что газовые силы, действующие на рабочие элементы вакуумного насоса или компрессора, не могут вызвать значительных изменений радиального зазора. А вот тепловые деформации спиральных элементов в 5 - 7 раз превышают силовые и являются важнейшим фактором, влияющим на величину зазора в НВСП. При величине радиального зазора 100 мкм его изменение за счет тепловых деформаций может составлять до 25 % и это нужно обязательно учитывать при верификации и валидации [4, 5, 7] математической модели рабочего процесса.

Говоря о радиальном зазоре, следует помнить, что в НВСП (рис. 1) существует два вида рабочих полостей [8, 9]: полость А образуется между внешней поверхностью неподвижной и внутренней поверхностью подвижной спиралей. Вторая полость – Б образована между наружной поверхностью подвижной спирали и внутренней поверхностью неподвижной. Отметим, что объем полости А меньше объема Б и каждой полости может соответствовать свой радиальный зазор. Кроме того, при работе НВСП температура подвижной спирали всегда выше неподвижной из-за худшего отвода тепла от подвижного спирального элемента, находящегося в вакуумной полости. Поэтому при работе насоса и его нагреве радиальный зазор в полости А, как правило, увеличивается, а в полости Б – уменьшается.

Рассмотрим теперь на примере насоса вакуумного спирального НВСП-12 (рис. 1) производства АО «Вакууммаш» (г. Казань), как изменяется радиальный зазор по углу орбитального движения спирали под влиянием вышеназванных факторов. Стоит отметить, что в НВСП-12 монтажный зазор для двух полостей одинаковый и равен 95 мкм.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ**

Для расчета тепловых деформаций используем методику, представленную в работах [8, 10]. На первом этапе с помощью «камерной» термодинамической модели рабочего процесса [5] или CFD-метода находится температура газа и температуры спиралей по углу закрутки. Затем в пакете [11] рассчитываются тепловые деформации спиральных элементов и вычисляется величина радиального зазора по углу поворота приводного вала. Далее величина зазора вносится в математическую модель. Полученное изменение радиального зазора для внешней и внутренней полостей с учетом тепловых деформаций спиральных элементов представлено на рис. 2. Данный анализ позволил получить расчетные индикаторные диаграммы НВСП с учетом изменения радиального зазора от тепловых деформаций. Такая диаграмма для полости А представлена на рис. 3. Там же приведены экспериментальные индикаторные диаграммы, полученные для опытного образца НВСП в работах [12, 13].

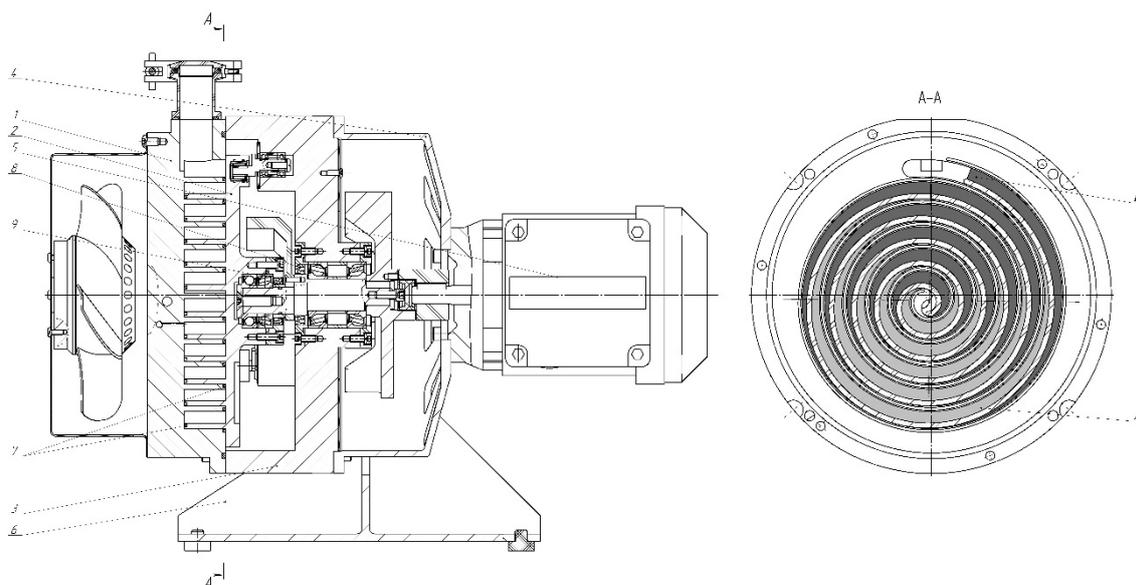


Рис. 1. Спиральный вакуумный насос НВСп-12.

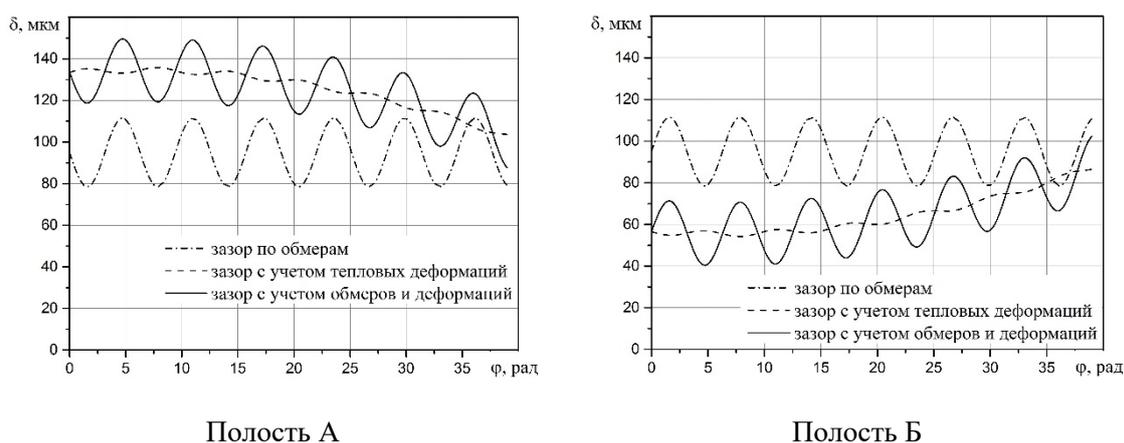


Рис. 2. Изменение радиального зазора НВСп. ( $e = 4,59$  мм,  $n = 1500$  об/мин,  $P_{вх} = 2,66$  кПа).

Сравнение расчетной индикаторной диаграммы (рис. 3) с экспериментом показывает, что недостаточно учитывать изменение радиального зазора от тепловых деформаций, поскольку на результаты расчета накладывается еще отклонение действительного профиля спирали от теоретического за счет погрешности изготовления. Чтобы учесть последний фактор для нахождения наиболее точной величины радиального зазора необходимо использовать в качестве величины начального приближения результаты обмеров профильной части спиральных элементов.

Обмеры профильной части спиральных элементов, используемых в насосе, испытываемом в работах [12, 13], проводились на координатно-измерительной машине CARL ZEISS CONTURA G2 [14]. Полученные в результате таких измерений значения монтажного зазора представлены на рис. 2. Там же нанесен полный зазор, найденный с учетом тепловых деформаций и действительного профиля спиралей. Отметим, что расчет индикаторной диаграммы по данной методике (кривая 3 на рис. 3) дает наилучшее согласие с экспериментом.

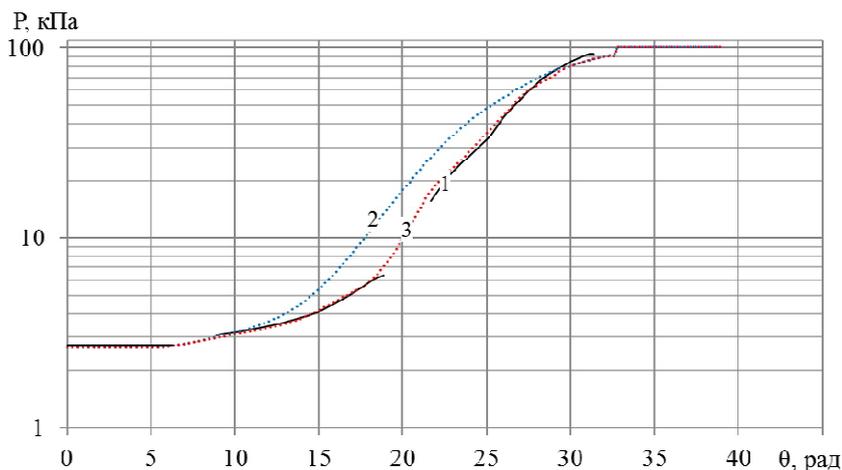


Рис. 3. Индикаторная диаграмма НВСп для полости А ( $e = 4,59$  мм,  $n = 1500$  об/мин,  $P_{вх} = 2,66$  кПа). 1 – эксперимент; 2 – расчет с учетом тепловых деформаций; 3 – расчет с учетом тепловых деформаций и обмеров.

Интересно рассмотреть, индикаторные диаграммы НВСп в P-V координатах. При работе насоса на высоких входных давлениях (рис. 4) давление в отсеченном объеме в точке 2,1 превышает давление выхода и возникает пережатие газа. При этом до точки 2,2 перетекания преимущественно направлены в сторону входа, поэтому увеличение зазора приводит к росту давления в рабочем объеме. После точки 2,2 поток перетеканий в направлении выхода превышает поток в сторону входа, и увеличение зазора приводит к снижению давления в отсеченном объеме и соответствующему снижению мощности.

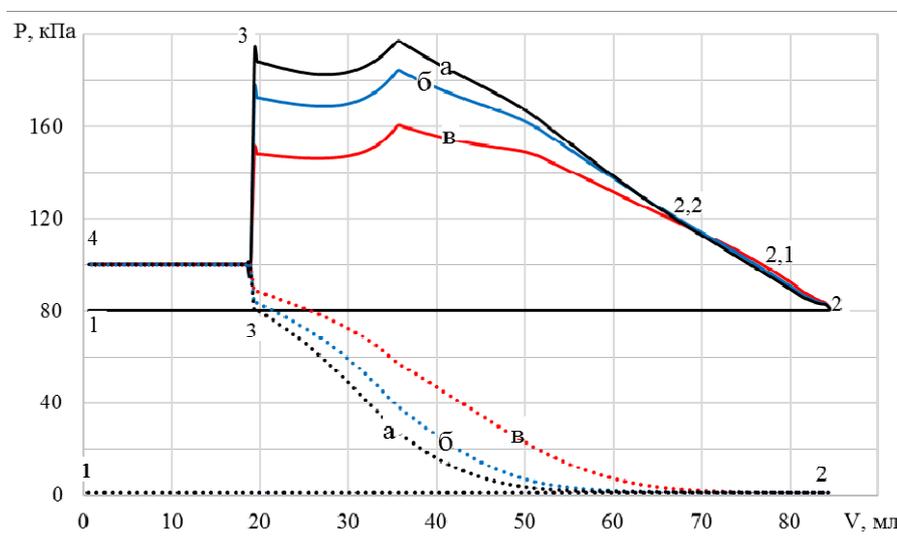


Рис. 4. Индикаторные диаграммы НВСп при различных зазорах для входных давлений 1 и 80 кПа процесс всасывания. 1-2; сжатие 2-3; нагнетание 3-4; а – 85 мкм; б – 105 мкм; в – 155 мкм; линия –  $P_{вх} = 80$  кПа; точки –  $P_{вх} = 1$  кПа.

## ВЫВОДЫ

Вышесказанное позволяет сделать важный практический вывод, что плавное увеличение радиального зазора между спиралью к центру позволяет снизить

индикаторную мощность при высоких входных давлениях. При этом увеличение мощности при низких давлениях будет незначительным.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Райков, А.А. Спиральные вакуумные насосы. Монография / А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров; Минобрнауки России, Казан.нац. исслед. технол. ун-т. - Казань: Издательство КНИТУ, 2018. - 220с.
- [2] 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.
- [3] Гаврилов А.В. Стенд для исследования масс-спектра остаточного газа безмасляных вакуумных насосов и агрегатов / А.В. Гаврилов, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, И.Ш. Гимадиев, А.Н. Свидетелев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17, № 12. – С. 129-132.
- [4] Паранин Ю. А. Совершенствование метода расчета рабочего процесса спирального компрессора сухого сжатия с использованием результатов экспериментальных исследований : Дис. канд. техн. наук: 05.04.06 / Паранин Юрий Александрович. – Казань : Казанский государственный технологический университет, 2011. – 254 с.
- [5] Райков, А.А. Моделирование тепловых деформаций спиральных элементов безмасляного вакуумного насоса / А. А. Райков, Р. Р. Якупов, С. И. Саликеев, А. В. Бурмистров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2015, – № 3 (102). - С.92-102.
- [6] Райков, А.А. Силовые деформации рабочих элементов безмасляного спирального вакуумного насоса / А. А. Райков, Р. Р. Якупов, А. В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2015, №1 (658) – С.57-63.
- [7] Ибрагимов Е.Р. Повышение эффективности спирального компрессора сухого сжатия : Дис. канд. техн. наук: 05.04.06 / Ибрагимов Евгений Рашитович. – Казань : Казанский государственный технологический университет, 2009. – 134 с.
- [8] Burmistrov, A. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump : Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics / Burmistrov A., S. Salikeev, Raykov A., M. Fomina // Vakuuum in Forschung und Praxis. - 2017. - Vol. 29. - Is. 6. – P. 28-31.
- [9] SUN Shuaihui, Wang Zhe, GUO Pengcheng, ZHANG, MAO Zhenkai Optimization of the tip profile of orbiting scroll in an asymmetry suction chamber scroll compressor, Vacuum, 2015, Vol. 116, pp. 144-152.
- [10] 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 // Vakuuum in Forschung und Praxis. - 2015. - Vol. 27. - Is. 1. – P. 36-40.
- [11] Ansys, Inc. license file for Kazan National Research Technology University c/n 657938.
- [12] Тюрин А.В. Экспериментальные индикаторные диаграммы безмасляного спирального вакуумного насоса / А.В. Тюрин, А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров // Компрессорная техника и пневматика. – 2018. – № 4. – С. 12-16.
- [13] Tyurin A. Indicator diagrams of oil free scroll vacuum pumps / A. Tyurin., A. Burmistrov, S. Salikeev, A. Raykov, M. Fomina // Vakuuum in Forschung und Praxis. - 2019. - Vol. 31. - Is. 4. – P. 34 -37.
- [14] ZEISS Russia & CIS URL: <https://zeiss-solutions.ru/equipment/promyshlennaya-metrologiya/koordinatno-izmeritelnye-mashiny/zeiss-contura/>. (дата обращения 5 декабря 2021).