

СЕКЦИЯ 2. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

**МЕТОД РАСЧЕТА ОТКАЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВН ТИПА РУТС,
РАБОТАЮЩИХ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ (ВЯЗКОСТНЫЙ РЕЖИМ
ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ЗАЗОРАХ)**

**METHOD FOR CALCULATION OF PUMPING CHARACTERISTICS OF ROOTS
PUMP WORKING AT HIGH PRESSURES (VISCOUS GAS FLOW IN CLEARANCES)**

А. А. Исаев^{1,2} / isaevaa050391@yandex.ru,,

А. В. Бурмистров¹ / burm@kstu.ru,

А. А. Райков¹ / alraykov@kstu.ru,

С. И. Саликеев¹ / salikeev_s@mail.ru

A. A. Isaev, A. V. Burmistrov, A. A. Raiko, S. I. Salikeev

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань

²АО «Вакууммаш», г. Казань

Рассматривается метод расчета откачных характеристик двухроторного вакуумного насоса типа Рутс, основанный на уравнениях состояния и сохранения энергии, записанных в дифференциальной форме. Проведена верификация разработанной математической модели путем сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными, полученными для насоса ДВН-50 при работе на разных частотах вращения и в агрегате с различными форвакуумными насосами. Показано, что для обеспечения лучшей сходимости расчета и эксперимента необходимо провести дополнительные исследования потерь, возникающих при заполнении отсеченных объемов.

Method for calculation of pumping characteristics of Roots pump based on equations of state and energy conservation written in differential form is considered. Verification of the developed mathematical model is carried out by comparison of calculated results and experimental data obtained for Roots pump DVN-50 when working with different forepumps at different rotation speeds. It is shown that in order to obtain better convergence of calculated and experimental data it is necessary to carry out additional study of losses arising when cut off volumes are filled.

Ключевые слова: двухроторный насос, перетекания газа, индикаторные диаграммы, быстрота действия.

Keywords: Roots pump, gas flow, full power, pumping speed.

ВВЕДЕНИЕ

Двухроторные вакуумные насосы типа Рутс (ДВН) традиционно являются одними из наиболее востребованных средств получения вакуума [1, 2]. Особенно актуальным расширением номенклатуры выпуска ДВН и совершенствования их конструкций стало в связи с массовым переходом потребителей вакуумной техники на использование безмасляных вакуумных насосов. Как известно, ДВН, чаще всего, используют в качестве первой ступени откачки, последовательно присоединяя к ним форвакуумные насосы различных типов. Это приводит к росту быстроты откачки технологического объема и снижению в десятки раз предельного остаточного давления.

В России ДВН серийно выпускаются лишь на АО «Вакууммаш» (г.Казань) и представлены малыми насосами НВД-200 и НВД-600 с быстротой действия 200 и 600 м³/ч

[3]. С учетом курса России на импортозамещение такая номенклатура явно недостаточна для покрытия потребности отечественной промышленности и настоятельно требуется разработка целого ряда современных энергоэффективных ДВН. В первую очередь, требуются отечественные насосы гораздо большей производительности.

В настоящее время НИР и ОКР по разработке и освоению выпуска линейки ДВН с быстротой действия от 500 до 5000 м³/ч ведутся на АО «Вакууммаш» [4].

Создание новых двухроторных машин базируется на математическом моделировании процесса откачки, что позволяет прогнозировать откачные параметры проектируемого ДВН и выбирать оптимальные геометрические размеры роторного механизма.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчетов характеристик ДВН может использоваться модель, основанную на рассмотрении ДВН как объемно-скоростного средства откачки [5, 6]. При этом обратные перетекания через щелевые каналы рассматриваются с учетом подвижности стенок роторов. Метод работает во всех трех режимах течения газа в щелевых каналах и дает хорошее согласие с экспериментальными данными. Основными недостатками данного подхода являются использование при расчете усредненных по углу поворота роторов параметров газа в рабочей полости насоса, на входе и выходе. Кроме того, для учета динамических потерь при заполнении отсеченных объемов, снижающих быстроту действия насоса, используется коэффициент заполнения, определяемый экспериментально для конкретного насоса.

Избежать этих недостатков позволяет математическая модель, построенная на основе уравнений состояния и сохранения энергии, записанных в дифференциальной форме в виде [7, 8]

$$\frac{dP}{d\alpha} = \frac{k-1}{\omega V} \left(\omega \frac{dQ_T}{d\alpha} + G_{пр} h_{пр} - G_{ут} h_{ут} - \frac{k}{k-1} \omega P \frac{dV}{d\alpha} \right),$$

$$\frac{dT}{d\alpha} = \frac{(k-1)T}{\omega PV} \left(\omega \frac{dQ_T}{d\alpha} + \frac{k-1}{k} (G_{пр} - G_{ут}) \cdot h_{ут} + G_{пр} (h_{пр} - h_{ут}) - \omega P \frac{dV}{d\alpha} \right),$$
(1)

где Q_T – внешнее подведенное тепло; $G_{пр}, G_{ут}$ – секундный приход и уход газа; $h_{пр}, h_{ут}$ – энтальпия притекающего и утекающего газа; k – показатель адиабаты; P – давление газа; T – температура газа; V – объем газа; ω – угловая скорость ротора; α – угол поворота ротора.

Данный подход позволяет определить параметры газа при любом положении роторов и с успехом применялся для расчёта спиральных и кулачково-зубчатых насосов, работающих в вакуумном режиме, в работах [9, 10].

Система дифференциальных уравнений (1) решается методом последовательных приближений, так как изначально неизвестны параметры газа в отсеченных объемах. В результате решения находятся диаграммы давления и температуры в рассматриваемых объемах.

Индикаторная диаграмма для одной отсеченной полости ДВН показана на рис. 1.

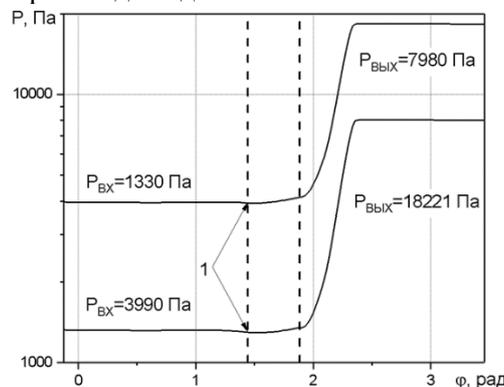


Рис. 1 Индикаторные диаграммы для отсеченной полости: 1 – начало процесса переноса газа в отсеченном объеме.

При низких давлениях всасывания давление в отсечённом объеме будет ниже входного (точка 1), что снижает действительную быстроту действия. Это объясняется влиянием сопротивления участка между ротором и корпусом на входном участке.

Быстрота действия для конкретного перепада давлений между входом и выходом определяется из уравнения

$$S_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\Gamma} T_{\Gamma}}{P_{\text{ВХ}}} \int_0^{2\pi} (M_{\text{ВХ} \rightarrow 1} - M_{1 \rightarrow \text{ВХ}}) d\varphi, \quad (2)$$

где $M_{\text{ВХ} \rightarrow 1}$ – массовый расход из патрубка входа в рабочую полость при входе, $M_{1 \rightarrow \text{ВХ}}$ – обратный поток в сторону входа, φ – угол поворота ротора, $P_{\text{ВХ}}, T_{\Gamma}$ – давление и температура на входе, R_{Γ} – газовая постоянная.

Проводимости межроторной и радиальных щелей в вязкостном, переходном и молекулярном режимах течения находились с помощью универсального метода расчета проводимости каналов [11].

Так как давление выхода неизвестно заранее, то для массива давлений в диапазоне $P_{\text{ВХ}} = \{0, S_{\Gamma, \text{ДВН}}\}$, $P_{\text{ВЫХ}} = \{0, S_{\text{МАХ.ФВН}}\}$ рассчитываются быстроты действия ДВН, которые затем описываются интерполяционной функцией

$$S_{\text{ДВН}} = f_1(P_{\text{ВХ}}, P_{\text{ВЫХ}}). \quad (3)$$

Из условия $S_{\text{ДВН}} P_{\text{ВХ}} = S_{\text{ФВН}} P_{\text{ВЫХ}}$ при известных характеристиках форвакуумного насоса данную функцию можно преобразовать к виду $P_{\text{ВХ}} = f_2(S_{\text{ФВН}}, P_{\text{ВЫХ}})$. Подставив давление входа в уравнение (3) можно получить откачную характеристику агрегата.

Разработанная математическая модель ДВН реализована в виде программ в пакете Mathematica [12]. Уравнения решались численным методом LSODE с автоматическим переключением на неявные методы, что позволяет разрешать проблему жесткости системы уравнений (1).

ОБСУЖДЕНИЕ

Верификация математической модели проведена путем сопоставления результатов расчета откачных характеристик насоса ДВН-50 с экспериментальными данными, полученными в работе [5]. Данный насос имел следующие основные размеры: радиус роторов $R=60$ мм, длина роторов $L=150$ мм, межроторный зазор $\square_{PP}=0,176$ мм, радиальные зазоры $\square_{PK1}=0,071$ мм, $\square_{PK2}=0,074$ мм, торцевые зазоры $\square_{T1}=\square_{T2}=0,11$ мм, геометрическая быстрота действия на один оборот ротора составляет $S_{\Gamma1}=1,9$ л/с.

Сопоставление расчетных и экспериментальных характеристик агрегата ДВН-50 с 2НВР-5ДМ, работающего при различных частотах вращения, представлено на рис.2. На рис.3 показаны зависимости, полученные при разных форвакуумных насосах. Расчетные характеристики получены путем решения уравнений (1)-(3) с учетом потерь быстроты действия во входном патрубке. Сопротивление входного патрубка учитывалось по формулам для короткого цилиндрического трубопровода [13]. Можно видеть, что при высоких частотах вращения (рис.2) и больших потоках (рис.2, 3) расчетные кривые располагаются выше экспериментальных, хотя отклонения не критичны. Отклонения объясняются тем, что в представленной математической модели не учитываются потери, возникающие при заполнении отсеченных объемов ДВН. Для их учета необходимы отдельные дополнительные исследования по аналогии, например, с работой [14].

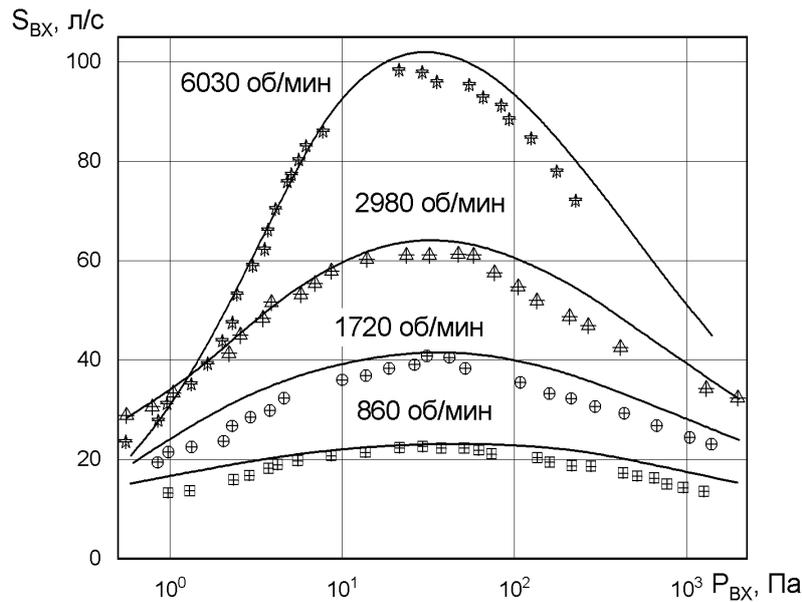


Рис. 2. Быстрота действия агрегата ДВН-50+2НВР-5ДМ: линии – расчет, точки – эксперимент [5].

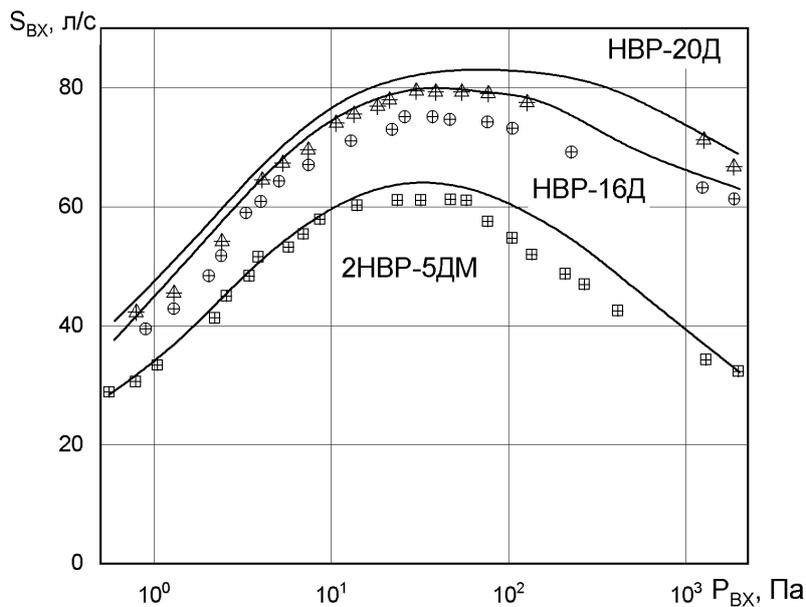


Рис. 3. Быстрота действия ДВН-50 в агрегате с различными форвакуумными насосами при частоте вращения роторов 3000 об/мин: линии – расчет, точки – эксперимент [5].

ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют оценить адекватность разработанной математической модели. Наличие отклонения расчета от эксперимента показывает, что необходим дополнительный учет сопротивлений, возникающих при заполнении отсеченных объемов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современное состояние рынка безмасляных форвакуумных средств откачки / И. В. Ануфриева, Ю. К. Васильев, В. Н. Кеменов, С. Б. Нестеров, Т. С. Строгова // Вакуумная техника и технология. – 2003. - Т.13, № 2. - С. 93-99.
2. Бурмистров, А.В. Некоторые аспекты выбора безмасляных насосов среднего вакуума / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, А.А. Райков // Вестник Казанского технологического университета. - 2013, Т.16. – № 10. - С.220-223.
3. НВД-200 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vacma.ru/products/roots_pump/nvd/382/, свободный
4. Бурмистров, А. В. Разработка нового типоразмерного ряда ДВН типа Рутс / А.В. Бурмистров, А.А. Райков, С.И. Саликеев, Е.Н. Капустин // Материалы XXVI научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника» с участием зарубежных специалистов под редакцией С.Б. Нестерова. М.: НОБЕЛЛА. - 2019. – С. 63-68.
5. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис... докт.техн.наук / А. В. Бурмистров; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. - 363с.
6. Бесконтактные вакуумные насосы: учебное пособие / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев; Федер. Агентство по образованию. Казан. гос. технол ун-т. – Казань: КГТУ, 2010. – 104 с.
7. Мамонтов, М. А. Вопросы термодинамики тела переменной массы / М. А. Мамонтов. – Тула: Приокское книжн.изд-во, 1970. – 87 С.
8. Фотин, Б. С. Рабочие процессы поршневых компрессоров: автореф. дис. ... д – ра техн. наук / Б. С. Фотин. – Л., 1974. – 34с.
9. Бурмистров А.В. Математическая модель рабочего процесса безмасляного спирального вакуумного насоса / А. В. Бурмистров, С. И. Саликеев, А. А. Райков, А.В. Тюрин, Р. Р. Якупов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2018, – № 6 (123). - С.103-113.
10. Raykov A, Salikeev S, Burmistrov A, Alyayev V, Fomina M The working process of an oil-free claw vacuum pump: A mathematical model for analysis of the pumping characteristics// Vakuuum in Forschung und Praxis 2017 Vol. 29 Is.2 P. 45-49.
11. Прямые и обратные потоки в бесконтактных вакуумных насосах: монография / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, М.Д. Бронштейн. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. -232 с.
12. Wolfram Mathematica license file for Kazan National Research Technology University # L3543-5535
13. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил.
14. Райков А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В. Исследование потерь во входном и выходном трактах кулачково-зубчатого вакуумного насоса // Компрессорная техника и пневматика. – 2009. -№ 8. - С.13-18.