

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЧКИ БЕСКОНТАКТНЫМИ НАСОСАМИ ВНЕШНЕГО СЖАТИЯ ГАЗОВ С РАЗЛИЧНЫМИ МОЛЕКУЛЯРНЫМИ МАССАМИ

А. А. Райков, А. А. Исаев, А. В. Бурмистров

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68

Отличительной особенностью двухроторных вакуумных насосов типа Рутс является селективность откачки, что обусловлено зависимостью обратных перетеканий через каналы роторного механизма от рода газа. Для исследования этого явления используется математическая модель рабочего процесса, основанная на решении дифференциальных уравнений системы с переменной массой. Проведенное сравнение экспериментальных и расчетных значений быстроты действия и максимального отношения давлений выхода и входа для гелия, аргона и воздуха показало расхождение не более 10 %. Расчеты показали, что в условиях вязкостного течения переход с откачки аргона на гелий снижает быстроту действия более чем на 10%, а степень повышения давления — на 50 %.

Ключевые слова: селективность откачки, быстрота действия, проводимость, обратные перетекания, двухроторный вакуумный насос, проводимость каналов, математическая модель.

Введение

Практически все высокотехнологичные процессы, протекающие в вакууме, требуют отсутствия паров углеводородов в откачиваемом объеме. Для получения низкого и среднего вакуума чаще всего используются различные типы бесконтактных насосов [1, 2]. Одной из важнейших составляющих откачной системы практически любой установки является двухроторный вакуумный насос внешнего сжатия типа Рутс, основным назначением которого является откачка больших потоков газа с целью снижения времени откачки технологических объемов и понижения давления для лучшей работы высоковакуумных насосов [3]. Достаточно часто откачиваемым газом является не воздух, а какой-либо другой газ, например гелий или аргон. В процессах нанесения тонких пленок приходится откачивать самые разные реакционные газы [4] или смеси газов. В этом случае характеристики агрегата изменяются. Поскольку насосы Рутса относятся к бесконтактным машинам, то им присуща значительная селективность откачки, связанная с влиянием молекулярной массы газа на обратные перетекания газа через зазоры.

Спрогнозировать, как изменятся откачные параметры, можно с помощью математической модели рабочего процесса. В последние годы для этой цели все чаще используются CFD-методы, позволяющие с высокой точностью рассчитать характеристики бесконтактных машин [5, 6]. К сожалению, практически все вычислительные пакеты, используемые для расчетов течения газов, относятся к сплошной среде и не захватывают область давлений, характерную для НВД.

Целью настоящей статьи является разработка математической модели рабочего процесса двухроторного вакуумного насоса типа Рутс, позволяющей

рассчитать откачные характеристики для различных газов в широком интервале рабочих давлений и валидация данной модели.

Описание математической модели

Разрабатываемая в настоящей работе, применительно к насосу внешнего сжатия типа Рутс, математическая модель рабочего процесса основана на дифференциальных уравнениях изменения состояния газа [7, 8]. Данный метод иногда называют камерным, поскольку он предполагает выделение контрольных объемов, в пределах которых параметры газа для данного момента времени считаются одинаковыми во всех точках объема.

В основе модели лежит ряд допущений:

- рабочее тело однородно и распределено равномерно в пределах рассматриваемой полости (нет градиента давлений и температур), отсутствуют конденсирующиеся пары;
- рассматриваемая среда подчиняется законам идеального газа, состояние которого описывается уравнением Менделеева – Клапейрона;
- отсутствуют газодинамические потери за счет трения газа о стенки рабочей полости;
- пульсации давлений за счет динамических явлений во всасывающем и нагнетательном патрубках не учитываются;
- роторы вращаются равномерно, не учитывается влияние газовых сил на скорость вращения.

Таким образом, математическая модель нагнетателя Рутс (рис. 1) представляет собой термодинамическую модель рабочей полости с допущениями о равномерности распределения термодинамических параметров по ее объему в каждый момент времени. Базовыми уравнениями являются законы сохранения энергии, массы и уравнение состояния идеального газа

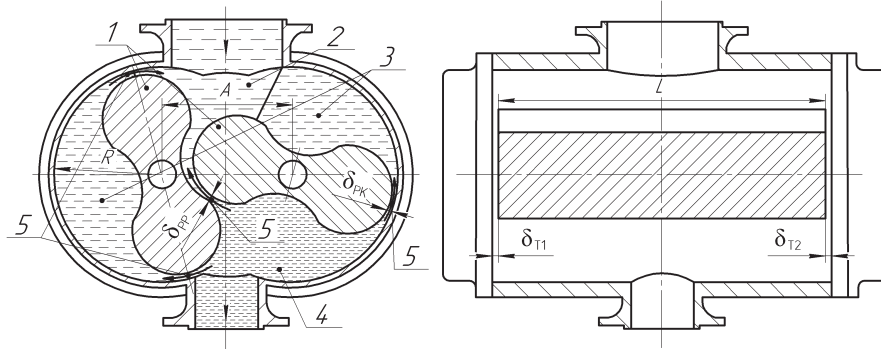


Рис. 1. Схема НВД-200: 1 — роторы; 2, 3, 4 — контрольные объемы (всасывание, перенос отсечённого объема и нагнетание соответственно); 5 — обратные перетекания

Fig. 1. NVD-200 scheme: 1 — rotors; 2, 3, 4 — control volumes (suction, cut-off volume transfer and injection, respectively); 5 — backflows

$$\frac{dP}{d\varphi} = \frac{k-1}{\omega V} \left(\begin{array}{l} \omega \frac{dQ_T}{d\varphi} + M_{пр} h_{пр} - \\ - M_{ут} h_{ут} - \frac{k-1}{k} \omega P \frac{dV}{d\varphi} \end{array} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dT}{d\varphi} = \frac{(k-1)T}{\omega PV} \times$$

$$\times \left(\begin{array}{l} \omega \frac{dQ_T}{d\varphi} + \frac{k-1}{k} (M_{пр} - M_{ут}) h_{ут} + \\ + M_{пр} (h_{пр} - h_{ут}) - \omega P \frac{dV}{d\varphi} \end{array} \right),$$

где Q_T — внешнее подведенное тепло (Дж); $M_{пр}$, $M_{ут}$ — секундный приход и уход газа из контрольного объема (кг/с); $h_{пр}$, $h_{ут}$ — энтальпия притекающего и утекающего газа (Дж); k — показатель адиабаты; P — давление (Па); T — температура (К); V — объем (m^3); ω — угловая скорость ротора (рад/с); φ — угол поворота ротора (рад).

Для решения дифференциального уравнения геометрия рабочей полости описывается в виде параметрических уравнений. Для определения объема полости V находится криволинейный интеграл по замкнутому контуру от кривых, ограничивающих данный объем. В результате на всей протяженности рабочего процесса строится зависимость $V = f(\varphi)$. Аналогичным образом находится площадь поверхности теплообмена.

Данная модель применительно к спиральным вакуумным насосам разработана в работе [9], а к кулачково-зубчатым — в работе [10]. Однако во всех данных работах в качестве откачиваемого газа использовался только воздух, а в настоящей статье рассмотрим расчет характеристик НВД по гелию, воздуху и аргону и сопоставим результаты расчета с экспериментом.

Как видно из уравнения (1), основные отличия при расчете процесса для различных газов заключаются в величине показателя адиабаты k и теплоемкости при постоянном давлении c_p , которая входит в уравнение энтальпии $h = c_p T$. Однако определяющим фактором являются величины массовых расходов газа, перетекающих между контрольными объемами и зависящих от рода газа. Массовый расход газа (кг/с), притекающего в полость, определяется в виде

$$M_{пр} = m_{вс} + m_{наг} + m_T + m_{pp} + m_{pc} \quad (2)$$

где $m_{вс}$ — перетечки из патрубка всасывания в расчетную полость, $m_{наг}$ — перетечки из полости нагнетания в расчетную полость, m_T — перетечки через торцевую щель между торцами роторов и крышками в расчетную полость, m_{pp} — перетечки через щель между роторами в расчетную полость, m_{pc} — перетечки через зазоры между роторами и цилиндрическими расточками корпуса в расчетную полость.

Потоки газа, перетекающие из патрубков всасывания и нагнетания, рассчитываются по уравнению массового расхода через диафрагму с учетом коэффициента массового расхода. Коэффициент массового расхода находится методом статических продвоек численным методом в пакете Ansys Fluent [11] и представлен в виде аппроксимационной зависимости от угла поворота ротора

$$\mu = 6 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^3 - 0,0009 \varphi^2 + 0,0298 \varphi + 0,659. \quad (3)$$

Отклонение результатов расчета по формуле (3) от результатов моделирования не превышает 8 %.

Канал между торцами роторов и торцевыми крышками представляет собой плоскую щель, высота которой соответствует величине монтажного зазора с учетом тепловых деформаций роторов и корпуса. Длина и ширина канала переменны и зависят от угла поворота ротора.

Каналы между торцами роторов и крышками образованы криволинейными стенками. Причем если для канала ротор–корпус радиус кривизны постоянный, то кривизна стенок канала ротор–ротор в окрестности зазоров меняется в зависимости от угла поворота ротора. Если рассматривать рабочую полость в неподвижной системе координат, то стенки этой полости будут совершать движение относительно нее. Наибольшее влияние это движение будет оказывать в окрестностях зазора, за счет чего возрастают величины обратных перетеканий.

Потоки перетеканий через радиальные каналы определяются по методике, описанной в работе [12], в которой учитывается скорость движения стенок канала. Она основана на допущении о том, что профиль распределения скорости в канале представляет собой параболу, концы которой определяются скоростью перемещения стенки с условием пристеночного скольжения при низких давлениях. Дифференциальное уравнение для определения расхода через канал решается методом последова-

тельных приближений. В качестве первого приближения при расчете используется выражение

$$q = \frac{1}{3}(w_1 + w_2)\delta(P_{in} + P_{out}) + \frac{\sqrt{2}(P_{in}^2 - P_{out}^2)}{9\pi\mu(r_1 + r_2)}\delta^{5/2}(r_1 - r_2)^{1/2}\left(\frac{12\lambda_0}{\delta(P_{in} + P_{out})} + 1\right), \quad (4)$$

где P_{in} , P_{out} — давления на входе и выходе из канала (Па), r_1 , r_2 — радиусы кривизны стенок канала в окрестностях зазора δ (м), w_1 , w_2 — скорости стенок канала (м/с), λ_0 — длина свободного пробега молекул газа (м).

Как видно из уравнения (4) в вязкостном режиме род газа оказывает влияние на вязкость μ , тогда как при приближении к молекулярному режиму увеличивается роль длины свободного пробега молекул λ_0 . Таким образом, при переходе от аргона к воздуху, а затем к гелию, увеличиваются величины обратных перетеканий, что обуславливает селективность откачки насоса.

Величина теплового потока определяется по выражению $Q_T = \alpha F(T_{CT} - T)$, где α — коэффициент теплообмена, F , T_{CT} — площадь поверхности и температура соответствующей стенки ротора или корпуса.

Для расчета теплообмена в модели используются выражения, полученные в работе [13], в основе которых лежит использование критериальных уравнений

$$Nu(\varphi_p) = B \cdot Re(\varphi_p) + A_1 \cdot Pr + A_2,$$

$$Re(\varphi_p) = \frac{wD_{ЭКВ}(\varphi_p)}{v(\varphi_p)},$$

где A_1 , A_2 , B — эмпирические коэффициенты, полученные при исследовании теплообмена в насосе, $v(\varphi_p)$ — коэффициент кинематической вязкости газа (м²/с), w — средняя скорость газа в рабочей полости (м/с), $D_{ЭКВ}$ — эквивалентный диаметр поперечного сечения рабочей полости (м).

Однако для учета разрежения газа в них внесена поправка на изменение динамической вязкости

$$\mu = \frac{\mu_{АТМ}}{1 + \beta \cdot Kn},$$

где Kn — число Кнудсена, $\mu_{АТМ}$ — динамическая вязкость газа при атмосферном давлении (Па·с).

Коэффициент β как функция от числа Кнудсена представлен в работе [14].

В процессе работы изменяется температура роторов и корпуса, происходит их тепловое расширение, меняются величины зазоров, что, в свою очередь, оказывает влияние на откачные характеристики. Для учета этого явления проводилось экспериментальное термометрирование насоса. В результате была получена зависимость

$$T_p = 1,502 T_K - 150,94,$$

где T_p , T_K — температура роторов и корпуса соответственно (К).

Температура корпуса определяется из выражения

$$T_K = k_1 + n(k_2 P_{ВХ} - k_3 P_{ВЫХ}),$$

где $k_1 = 305,16$; $k_2 = -3,68 \cdot 10^{-5}$; $k_3 = 2,77 \cdot 10^{-5}$; n — частота вращения ротора (об/с).

Таким образом, определив температуры рабочих элементов насоса и зная величины монтажных зазоров $\delta_{РКМ}$, $\delta_{Т1М}$, $\delta_{Т2М}$ можно рассчитать действительный зазор с учетом тепловых деформаций.

Для зазора ротор — корпус

$$\delta_{РК} = \delta_{РКМ} + R[\alpha_K(T_K - T_M) - \alpha_P(T_P - T_M)],$$

где α_P , α_K — коэффициент теплового расширения материалов ротора и корпуса соответственно (К⁻¹).

Для зазора ротор — ротор

$$\delta_{РР} = \delta_{РРМ} + A \cdot \cos\gamma[\alpha_P(T_P - T_M) - \alpha_K(T_K - T_M)],$$

где γ — угол наклона общей нормали к точке в месте минимального зазора (рад).

Для торцевых зазоров

$$\delta_{Т1} = \delta_{Т1М} + l_{П1}[\alpha_K(T_K - T_M) - \alpha_P(T_P - T_M)],$$

$$\delta_{Т2} = \delta_{Т2М} + (L + l_{П2})[\alpha_K(T_K - T_M) - \alpha_P(T_P - T_M)],$$

где $l_{П1}$ — расстояние от упорного подшипника до торца ротора (м).

Система уравнений (1) записывается для каждого контрольного объема. Для рассматриваемого насоса можно выделить четыре таких объема: объемы в окрестностях патрубка всасывания, нагнетания и пара отсеченных объемов (рис. 1). Каждый из них описывается математически в виде зависимости объема полости и площади поверхности теплообмена от угла поворота ротора.

Далее записанная система уравнений решается в пакете Mathematica методом LSODE (Livermore Solver for Ordinary Differential Equations). Так как параметры газа в объемах взаимозависимы за счет перетеканий, то процесс решения носит итерационный характер. Критерием сходимости являются минимальные различия давления и температуры между итерациями.

Результатом решения уравнений являются зависимости давления и температуры от угла поворота ротора. Зная эти параметры, можно рассчитать остальные составляющие уравнения 1: тепловой поток и массовые расходы газа через каналы.

Быстрота действия рассчитывается через усредненный за 1 оборот ротора массовый расход газа во входном сечении [15]. Индикаторная работа определяется как интеграл произведения давления на производную от объема полости за 1 оборот.

В качестве объекта для валидации матмодели используем насос НВД-200 производства АО «Вакууммаш», откачные характеристики которого по воздуху, гелию и аргону экспериментально исследованы в работе [16]. Насос имел следующие основные размеры: радиус расточки корпуса $R = 60$ мм, межцентровое расстояние $A = 75$ мм, длина ротора $L = 150$ мм.

Результаты расчета

На рис. 2, 3 сопоставлены результаты экспериментального измерения быстроты действия и максимального отношения давлений выхода и входа с результатами расчета с помощью матмодели по гелию, воздуху и аргону. Расхождение между расчетом и экспериментом не превышает 10 %, что позволяет сделать вывод об адекватности матема-

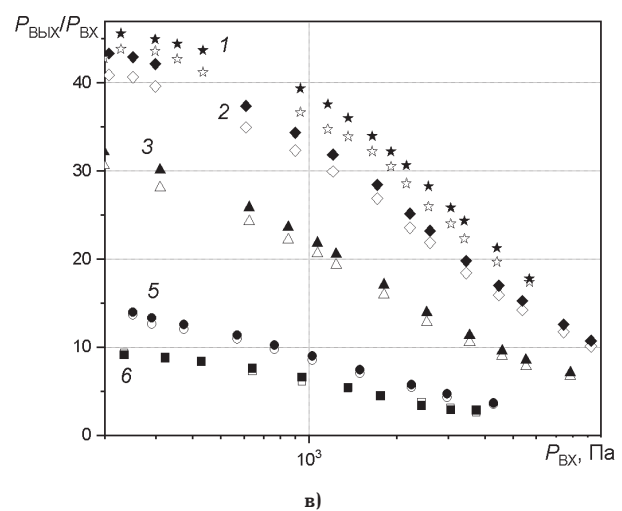
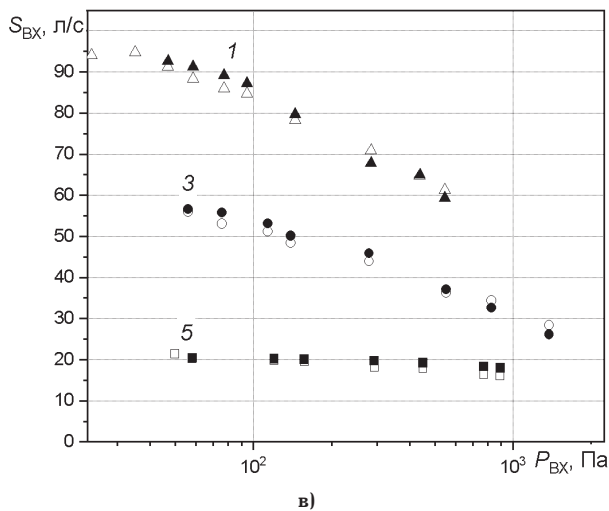
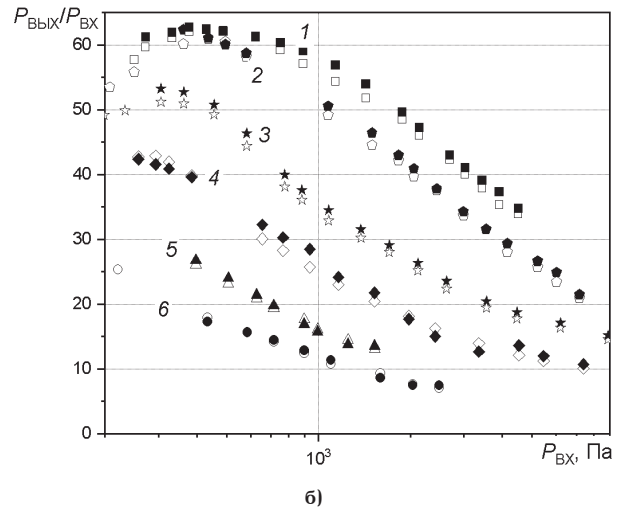
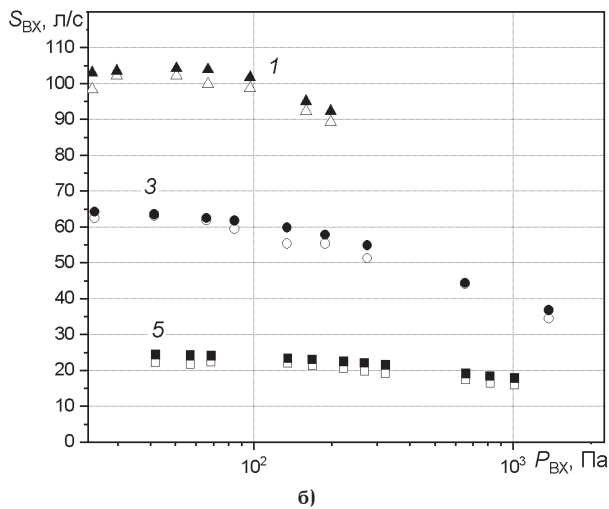
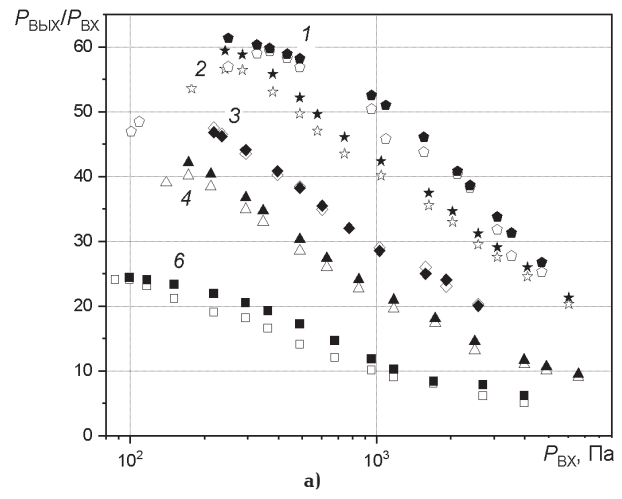
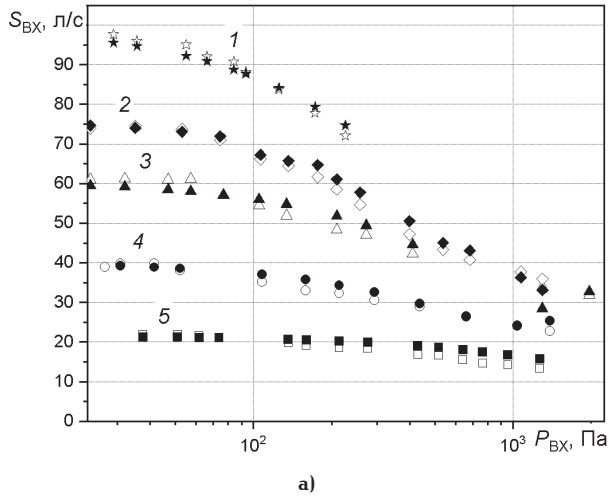


Рис. 2. Быстрота действия для воздуха (а), аргона (б), гелия (в) при частотах вращения: 1 — 6030, 2 — 4150, 3 — 2980, 4 — 1720, 5 — 860 об/мин (маркеры с затенением — расчет, без затенения — эксперимент)
 Fig. 2. Pumping speed for air (a), argon (б), helium (в) at rotational speeds: 1 — 6030, 2 — 4150, 3 — 2980, 4 — 1720, 5 — 860 min⁻¹ (markers with shading — calculation, without shading — experiment)

Рис. 3. Степени повышения давления для воздуха (а), аргона (б), гелия (в) при частотах вращения: 1 — 6150, 2 — 5150, 3 — 2980, 4 — 1690, 5 — 1050, 6 — 700 об/мин (маркеры с затенением — расчет, без затенения — эксперимент)
 Fig. 3. Compression ratio for air (а), argon (б), helium (в) at rotational speeds: 1 — 6150, 2 — 5150, 3 — 2980, 4 — 1690, 5 — 1050, 6 — 700 min⁻¹ (markers with shading — calculation, without shading — experiment)

тической модели и возможности ее использования для анализа рабочего процесса НВД.

Рассмотрим, как меняется быстрота действия НВД при переходе с аргона на воздух и далее на гелий (рис. 4). При паспортной частоте враще-

ния 2980 об/мин и работе в агрегате с форвакуумным насосом с быстротой действия 5 л/с на входном давлении 1000 Па быстрота действия агрегата составляет 60,1; 56; 54, 5 соответственно. Таким образом, при данных условиях переход с воздуха

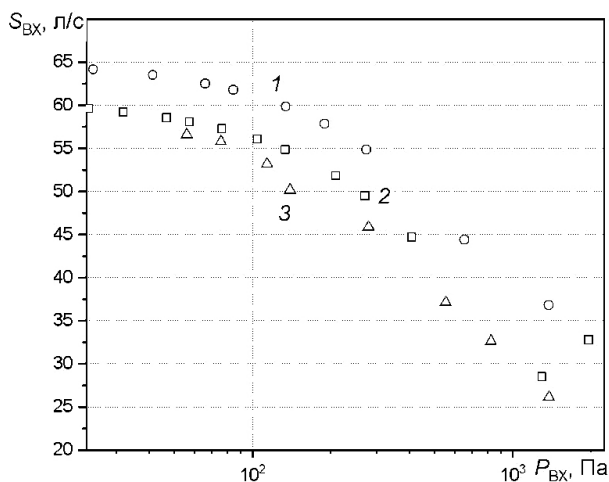


Рис. 4. Сравнение быстродействия для разных газов при 2980 об/мин: 1 — Ar, 2 — воздух, 3 — He
Fig. 4. Pumping speed comparison for different gases at 2980 min⁻¹: 1 — Ar, 2 — air, 3 — He

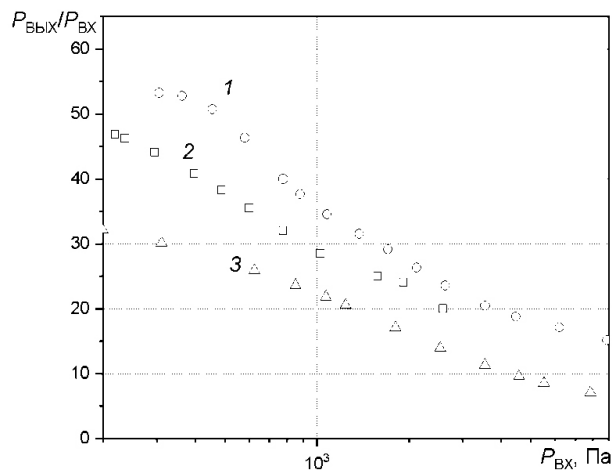


Рис. 5. Сравнение степени повышения давления для разных газов при 2980 об/мин: 1 — Ar, 2 — воздух, 3 — He
Fig. 5. Compression ratio comparison for different gases at 2980 min⁻¹: 1 — Ar, 2 — air, 3 — He

на гелий снижает быстродействие более чем на 10 %.

Из сопоставления характеристик (рис. 5) также следует, что максимальное отношение давлений сильнее зависит от рода газа, например, при частоте вращения роторов 2980 об/мин и давлении на выходе 1000 Па для аргона, воздуха и гелия значения $P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$ составляют соответственно 37, 29 и 24,8, т. е. при аналогичном переходе отношение давлений падает почти на 50 %.

Выводы

Проведенные расчеты показали, что разработанная матмодель позволяет определять быстродействие двухроторных насосов при откачке различных газов с погрешностью не больше 10 %. Переход с откачки аргона на гелий снижает быстродействие более чем на 10 %, а максимальное отношение давлений — на 50 %.

Список источников

1. Бурмистров А. В., Саликеев С. И., Бронштейн М. Д. Прямые и обратные потоки в бесконтактных вакуумных насосах: моногр. Казань: Изд-во КГТУ, 2009. 232 с. ISBN 978-5-7882-0720-9. EDN: QMKQDN.
2. Ануфриева И. В., Васильев Ю. К., Кеменов В. Н. [и др.]. Современное состояние рынка безмасляных форвакуумных средств откачки // Вакуумная техника и технология. 2003. Т. 13, № 2. С. 93–99.
3. Хаблянян М. Х., Саксаганский Г. Л., Бурмистров А. В. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч. 1. Инженерно-физические основы. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. 237 с.
4. Jousten K., Dirscherl J., Lachenmann R. [et al.]. Positive Displacement Pumps // Vacuum Technology. 2016. P. 259–360. DOI: 10.1002/9783527688265.ch7.
5. Бурмистров А. В., Райков А. А., Саликеев С. И., Капустин Е. Н. Моделирование рабочих процессов бесконтактных безмасляных вакуумных насосов методами вычислительной гидродинамики (CFD) // Вакуумная техника и технология-2021: тр. 28-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. С. 16–22.
6. Wang J., Liu R., Yang S. [et al.]. Geometric study and simulation of an elliptical rotor profile for Roots vacuum

pumps // Vacuum. 2018. Vol. 153. P. 168–175. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.04.014.

7. Ибраев А. М. Повышение эффективности работы роторных нагнетателей внешнего сжатия на основе анализа влияния геометрических параметров на их характеристики: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1987. 208 с.

8. Саликеев С. И., Бурмистров А. В., Райков А. А. Единый подход к расчету откачных характеристик бесконтактных безмасляных вакуумных насосов // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 4. С. 37–42. EDN: RCSESP.

9. Бурмистров А. В., Саликеев С. И., Райков А. А., Тюрин А. В., Якупов Р. Р. Математическая модель рабочего процесса безмасляного спирального вакуумного насоса // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2018. № 6 (123). С. 103–114. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-6-103-114. EDN: VPKWJH.

10. Burmistrov A., Salikeev S., Raykov A., Fomina M. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump: Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics // Vakuum in Forschung und Praxis. 2017. Vol. 29 (6). P. 28–31. DOI: 10.1002/vipr.201700663.

11. Исаев А. А., Райков А. А., Бурмистров А. В., Саликеев С. И. Потери во входном тракте двухроторного вакуумного насоса // Вестник машиностроения. 2021. № 9. С. 44–46. DOI: 10.36652/0042-4633-2021-9-44-46. EDN: FTBNQZ.

12. Raykov A., Tyurin A., Burmistrov A., Bronstein M., Fomina M. Calculation of backward flow in channels with moving walls in oil free non-contact vacuum pumps // AIP Conference Proceedings. 2019. № 2141. 030024. P. 1–6. DOI: 10.1063/1.5122074.

13. Шаратов И. И. Разработка методики измерения и расчета параметров процесса теплообмена в шестеренчатом компрессоре с целью повышения точности расчета рабочего процесса: дис. ... канд. техн. наук. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 146 с.

14. Li Z., Li L., Zhao Y. [et al.]. Theoretical and experimental study of dry scroll vacuum pump // Vacuum. 2009. Vol. 84 (3). P. 415–421. DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.09.005.

15. 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. 2021. Т. 14, № S6. С. 330–337. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.6s.330.337. EDN: JKHVQO.

16. Бурмистров А. В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис. ... д-р техн. наук. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006. 363 с.

РАЙКОВ Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ), г. Казань.
SPIN-код: 2689-5281

ORCID: 0000-0001-5495-7834

AuthorID (SCOPUS): 35810909900

Адрес для переписки: alraykov@kstu.ru

ИСАЕВ Александр Анатольевич, аспирант кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок» КНИТУ, г. Казань; начальник сектора механических вакуумных насосов АО «Вакууммаш», г. Казань.

ORCID: 0000-0001-9068-8555

AuthorID (SCOPUS): 57220075456

БУРМИСТРОВ Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафе-

дры «Вакуумная техника электрофизических установок» КНИТУ, г. Казань.

SPIN-код: 9713-8728

ORCID: 0000-0001-8612-540X

AuthorID (SCOPUS): 6603797728

ResearcherID: A-4254-2014

Адрес для переписки: burm@kstu.ru

Для цитирования

Райков А. А., Исаев А. А., Бурмистров А. В. Математическое моделирование откачки бесконтактными насосами внешнего сжатия газов с различными молекулярными массами // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 3. С. 46–52. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-46-52.

Статья поступила в редакцию 11.06.2024 г.

© А. А. Райков, А. А. Исаев, А. В. Бурмистров

UDC 621.521

DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-46-52

EDN: GCGPGM

MATHEMATICAL MODELING NON-CONTACT EXTERNAL COMPRESSION PUMPS WITH DIFFERENT MOLECULAR WEIGHTS GASES

A. A. Raykov, A. A. Isaev, A. V. Burmistrov

Kazan National Research Technological University,
Russia, Kazan, Karl Marx st., 68, 420015

A distinctive feature of Roots type vacuum pumps is the selective of pumping, which is due to the dependence of reverse flows on the type of gas. To study this phenomenon, a mathematical model of the work process is used, based on solving differential equations of a system with variable mass. Comparisons of the experimental and calculated values of pumping speed and pressure increase for helium, argon and air show a discrepancy of no more than 10 %. Calculations have shown that under viscous flow conditions, switching from pumping argon to helium reduces pumping speed by more than 10 % and pressure increase by 50 %.

Keywords: selective pumping, pumping speed, conductivity, backflows, Roots vacuum pump, channels conductivity, mathematical model.

References

1. Burmistrov A. V., Salikeev S. I., Bronshteyn M. D. Pryamyie i obratnyye potoki v beskontaktnykh vakuumnykh nasosakh [Forward and reverse flows in non-contact vacuum pumps]. Kazan, 2009. 232 p. (In Russ.).

2. Anufriyeva I. V., Vasilyev Yu. K., Kemenov V. N. [et al.]. Sovremennoye sostoyaniye rynka bezmaslyanykh forvakuumnykh sredstv otkachki [Current state of the market for oil-free forevacuum pumping equipment] // Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya. *Vacuum Science and Technology*. 2003. Vol. 13, no. 2. P. 93–99. (In Russ.).

3. Khablanyan M. Kh., Saksaganskiy G. L., Burmistrov A. V. Vakuumnaya tekhnika. Oborudovaniye, proyektirovaniye, tekhnologii, ekspluatatsiya. Ch. 1. Inzhenerno-fizicheskiye osnovy [Vacuum technology. Equipment, design, technology, operation. Part 1. Engineering and physical fundamentals]. Kazan, 2013. 237 p. (In Russ.).

4. Jousten K., Dirscherl J., Lachenmann R. [et al.]. Positive Displacement Pumps // *Vacuum Technology*. 2016. P. 259–360. DOI: 10.1002/9783527688265.ch7. (In Engl.).

5. Burmistrov A. V., Raykov A. A., Salikeev S. I., Kapustin E. N. Modelirovaniye rabochikh protsessov beskontaktnykh bezmaslyanykh vakuumnykh nasosov metodami vychislitel'noy gidrogazodinamiki (CFD) [Simulation of operating processes of non-contact oil-free vacuum pumps using computational fluid dynamics (CFD) methods] // *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya—2021. Vacuum Technique and Technology—2021*. Saint Petersburg, 2021. P. 16–22. (In Russ.).

6. Wang J., Liu R., Yang S. [et al.]. Geometric study and simulation of an elliptical rotor profile for Roots vacuum pumps // *Vacuum*. 2018. Vol. 153. P. 168–175. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.04.014. (In Engl.).

7. Ibraeev A. M. Povysheniye effektivnosti raboty rotornykh nagnetateley vneshnego szhatiya na osnove analiza vliyaniya geometricheskikh parametrov na ikh kharakteristiki [Improving the

operating efficiency of rotary external compression superchargers based on an analysis of the influence of geometric parameters on their characteristics]. Kazan, 1987. 208 p. (In Russ.).

8. Salikeev S. I., Burmistrov A. V., Raykov A. A. Edinye podkhod k raschetu otkachnykh kharakteristik beskontaknykh bezmaslyanykh vakuumnykh nasosov [A concept of calculation of pumping characteristics of non-contact oil-free vacuum pumps] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressors and Pneumatics*. 2013. No. 4. P. 37–42. EDN: RCSESP. (In Russ.).

9. Burmistrov A. V., Salikeev S. I., Raykov A. A., Tyurin A. V., Yakupov R. R. Matematicheskaya model' rabocheho protsessa bezmaslyanogo spiral'nogo vakuumnogo nasosa [Mathematical simulation of a work cycle in an oil-free scroll vacuum pump] // *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Seriya «Mashinostroyeniye». Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2018. No. 6 (123). P. 103–113. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-6-103-114. EDN: VPKWJH. (In Russ.).

10. Burmistrov A., Salikeev S., Raykov A., Fomina M. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump: Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2017. Vol. 29 (6). P. 28–31. DOI: 10.1002/vipr.201700663. (In Engl.).

11. Isaev A. A., Raykov A. A., Burmistrov A. V., Salikeev S. I. Poteri vo vkhodnom trakte dvukhrotornogo vakuumnogo nasosa [Losses in the inlet path of a two-rotor vacuum pump] // *Vestnik mashinostroyeniya. Vestnik Mashinostroyeniya*. 2021. No. 9. P. 44–46. DOI: 10.36652/0042-4633-2021-9-44-46. EDN: FTBNQZ. (In Russ.).

12. Raykov A., Tyurin A., Burmistrov A., Bronstein M., Fomina M. Calculation of backward flow in channels with moving walls in oil free non-contact vacuum pumps // *AIP Conference Proceedings*. 2019. No. 2141. 030024. P. 1–6. DOI: 10.1063/1.5122074. (In Engl.).

13. Sharapov I. I. Razrabotka metodiki izmereniya i rascheta parametrov protsessa teploobmena v shesterenchatom kompressore s tsel'yu povysheniya tochnosti rascheta rabocheho protsessa [Development of a methodology for measuring and calculating the parameters of the heat exchange process in a gear compressor in order to increase the accuracy of the calculation of the working process]. Moscow, 2009. 146 p. (In Russ.).

14. Li Z., Li L., Zhao Y. [et al.]. Theoretical and experimental study of dry scroll vacuum pump // *Vacuum*. 2009. Vol. 84 (3). P. 415–421. DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.09.005. (In Engl.).

15. Isayev A. A., Burmistrov A. V., Raykov A. A., Salikeev S. I. Metod rascheta otkachnykh kharakteristik DVN tipa

Ruts, rabotayushchikh pri povyshennykh davleniyakh (vyazkostnyy rezhim techeniya gaza v zazorakh) [Method for calculation of pumping characteristics of roots pump working at high pressures (viscous gas flow in clearances)] // *Nanoindustriya. Nanoindustry*. 2021. Vol. 14, no. S6. P. 330–337. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.6s.330.337. EDN: JKHBQO. (In Russ.).

16. Burmistrov A. V. Sozdaniye i issledovaniye beskontaknykh vakuumnykh nasosov [Creation and research of non-contact vacuum pumps]. Moscow, 2006. 363 p. (In Russ.).

RAYKOV Alexey Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Vacuum Engineering Department, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan.

SPIN-code: 2689-5281

ORCID: 0000-0001-5495-7834

AuthorID (SCOPUS): 35810909900

Correspondence address: alraykov@kstu.ru

ISAEV Alexandr Anatolievich, Graduate Student of Vacuum Engineering Department, KNRTU, Kazan; Head of Mechanical Vacuum Pumps Sector, JSC «Vakuummash», Kazan.

ORCID: 0000-0001-9068-8555

AuthorID (SCOPUS): 57220075456

BURMISTROV Alexey Vasilevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Vacuum Engineering Department, KNRTU, Kazan.

SPIN-code: 9713-8728

ORCID: 0000-0001-8612-540X

AuthorID (SCOPUS): 6603797728

ResearcherID: A-4254-2014

Correspondence address: burm@kstu.ru

For citations

Raykov A. A., Isaev A. A., Burmistrov A. V. Mathematical modeling non-contact external compression pumps with different molecular weights gases // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 46–52. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-46-52.

Received June 11, 2024.

© A. A. Raykov, A. A. Isaev, A. V. Burmistrov