

DOI: 10.18721/JEST.25103
УДК 81.29.14

В.С. Ключаров, Н.К. Никулин, Е.В. Свичкарь

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛЕКУЛЯРНО-ВЯЗКОСТНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

В работе рассмотрены составляющие энергетических затрат высоковакуумных насосов, к которым относятся и молекулярно-вязкостные вакуумные насосы, являющиеся новой разработкой. Принцип действия молекулярно-вязкостных насосов позволяет им работать в широком диапазоне давлений, начиная с высокого вакуума и заканчивая низким. При повышении диапазона рабочих давлений, создаваемых насосом, как правило, происходит существенное увеличение мощности, потребляемой электродвигателем насоса. На данный момент не существует данных об энергетических затратах этих насосов. Анализ условий работы молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в разных диапазонах давлений позволил выявить основные факторы, влияющие на изменение мощности, а также способы ее снижения, например за счет перераспределения нагрузки в ступенях многоступенчатых конструкций насосов, изменения длин ступеней, скоростей вращения роторов насоса. Снижение энергетических затрат насоса позволит уменьшить потребление электроэнергии, себестоимость насосов, повысить эффективность их работы.

Ключевые слова: молекулярно-вязкостный вакуумный насос, энергетическая характеристика, мощность, регулирование скорости двигателя.

Ссылка при цитировании:

В.С. Ключаров, Н.К. Никулин, Е.В. Свичкарь. Энергетические характеристики молекулярно-вязкостных вакуумных насосов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 30–39. DOI: 10.18721/JEST.25103.

V.S. Klyucharov, N.K. Nikulin, E.V. Svichkar

Bauman Moscow State technical university, Moscow, Russia

ENERGY CHARACTERISTICS OF MOLECULAR-VISCOUS VACUUM PUMPS

The paper discusses the components of energy costs for high-vacuum pumps, which also include molecular-viscous vacuum pumps, which are a new modern development. The principle of operation of molecular-viscous pumps allows them to operate in a wide pressure range, i.e., from high vacuum through to low. Due to changes in the range of operating pressures generated by the pump, there is a significant increase in the power of the pump motor (typically with an increase in pressure). At the moment there is no data about the energy consumption of these pumps. Analysis of the working conditions of the molecular-viscous vacuum pump in various ranges of pressures helped to identify the main factors influencing the change in the power and measures for decreasing it, for example, by redistribution of loads in the stages of multistage pumps, change of step lengths, rotation speeds of pump rotors. Reducing the energy costs of the pump will reduce the power consumption and cost of pumps, improving their operational efficiency.

Keywords: molecular-viscous vacuum pump, power characteristic, power, speed regulation of the engine.

Citation:

V.S. Klyucharov, N.K. Nikulin, E.V. Svichkar, Energy characteristics of molecular-viscous vacuum pumps, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 30–39, DOI: 10.18721/JEST.25103.



Актуальность совершенствования существующих и создания новых средств откачки

Одна из наиболее актуальных задач развития и совершенствования вакуумных систем – обеспечение безмасляности технологического процесса, что достигается использованием вакуумного оборудования, соответствующего данному условию. Поэтому постоянно совершенствуются существующие вакуумные насосы, которые являются одним из основных источников паров углеводородов, способных загрязнить откачиваемые объемы. Например, подшипниковые узлы турбомолекулярных насосов (ТМН), в которых использовались подшипники качения, работающие с жидкой смазкой, заменены на подшипниковые узлы с керамическими подшипниками на консистентной вакуумной смазке либо на газовые и магнитные опоры. Такое решение позволяет улучшать конструктивные параметры современных турбомолекулярных насосов [1–5]. Параллельно с совершенствованием конструкций вакуумных насосов добиваются улучшения и расширения диапазонов откачных параметров насосов. Для этого в комбинированные турбомолекулярные вакуумные насосы устанавливаются дополнительные форвакуумные ступени, как правило, молекулярные, вихревые и молекулярно-вязкостные проточные части [6–13]. В результате в последних колесах турбомолекулярной проточной части снижена вероятность нарушения молекулярного режима течения газа, увеличен диапазон рабочих давлений всего насоса и давление газа в форвакуумной области, что позволяет снизить требования к форвакуумной системе откачки. Наиболее часто производители комбинированных ТМН используют молекулярные проточные части, которые могут работать не только в молекулярном, но и в молекулярно-вязкостном режиме течения газа [3–5, 6–13].

Создание новых типов вакуумных насосов, к которым можно отнести и молекулярно-вязкостные вакуумные насосы (МВВН) [7], со-

стоящие из молекулярно-вязкостных проточных частей, и совершенствование комбинированных ТМН на базе молекулярно-вязкостных проточных частей позволило увеличить быстроту действия не менее чем в два раза за счет наличия каналов на роторе и статоре, а также увеличить максимальное отношение давлений в молекулярно-вязкостном режиме. При использовании молекулярно-вязкостных проточных частей величина радиального зазора увеличена до $0,15 \cdot 10^{-3}$ м для ротора диаметром $60 \cdot 10^{-3}$ м [1, 3] без изменения откачных характеристик проточной части насоса.

Таким образом, создание новых и совершенствование существующих средств откачки позволяют расширять диапазоны рабочих параметров насосов, обеспечивать безмасляность откачки, упрощать условия эксплуатации и требования, предъявляемые к производству насосов. Для доработки существующих конструкций насосов и создания новых насосов необходимо разрабатывать новые методы расчета основных параметров насосов и экспериментально подтверждать полученные данные.

Энергетические характеристики вакуумных насосов

Одним из важных параметров вакуумных насосов является его энергетическая характеристика [14], определяющая изменение мощности двигателя насоса в зависимости от времени выхода на режим, геометрических и скоростных параметров насоса. Правильный выбор указанных параметров при проектировании вакуумного насоса позволяет понизить мощность, потребляемую электродвигателем и энергозатраты всей вакуумной системы, а тем самым не только уменьшить стоимость системы, но и работать в условиях ограниченного энергопотребления (например в космических аппаратах).

Работа МВВН в диапазоне давлений от 10 до 10^5 Па при окружной скорости на роторе 150–180 м/с приводит к чрезвычайно большим затратам мощности (рис. 1).

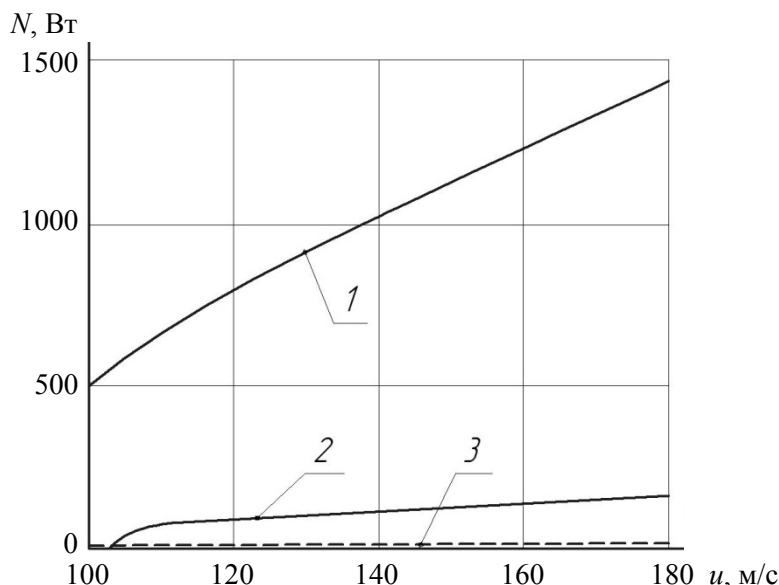


Рис. 1. Зависимость мощности, потребляемой ступенью МВВН, от окружной скорости движения ротора при давлении в ступени 10^5 (1), 10^4 (2) и 10^3 (3) Па

Fig. 1. The dependence of the power consumed by the stage MWN on the circumferential speed of the rotor at a pressure of 10^5 (1), 10^4 (2) и 10^3 (3)

Для уменьшения потребляемой мощности необходимо перераспределять скорости движения ступеней, уменьшая их по мере увеличения давления, что достигается применением ступеней с различными величинами диаметров. Основная нагрузка приходится на последние ступени при давлении 10^4 Па. Поэтому необходимо минимизировать окружную скорость движения поверхности ротора последней ступени с уменьшением ее диаметра, т.е. с уменьшением ее быстроты действия.

К тому же, согласно данным работы [15] на изменение потребляемой мощности влияет длина ступени. По рис. 2 видно, что отношение давлений зависит от длины проточной части насоса и диаметра ротора, т.к. величина диаметра определяет окружную скорость ротора. В результате с увеличением длины проточной части возрастает мощность насоса, затрачиваемая на сжатие газа.

В работе [14] отмечается необходимость применения энергосберегающих технологий

для повышения энергоэффективности вакуумных насосов в связи с ростом стоимости энергоносителей. Определение энергетических характеристик кулачково-зубчатых вакуумных насосов осуществляется теоретически по индикаторной диаграмме. Сведений об экспериментальном исследовании авторы не приводят.

Ведущие производители турбомолекулярных и диффузионных вакуумных насосов, относящихся, как и МВВН, к перекачивающим насосам, не публикуют полные данные по энергетическим характеристикам своих изделий. Данные о мощности по каталогам могут не включать максимальную выходную мощность, а для близких по параметрам насосов одного производителя могут указываться одинаковые показатели выходной электрической мощности. При этом в рамках класса вакуумных насосов мощности, приводимые в каталогах различных производителей, близки, в связи с чем можно говорить о сравнимости энергетических характеристик.

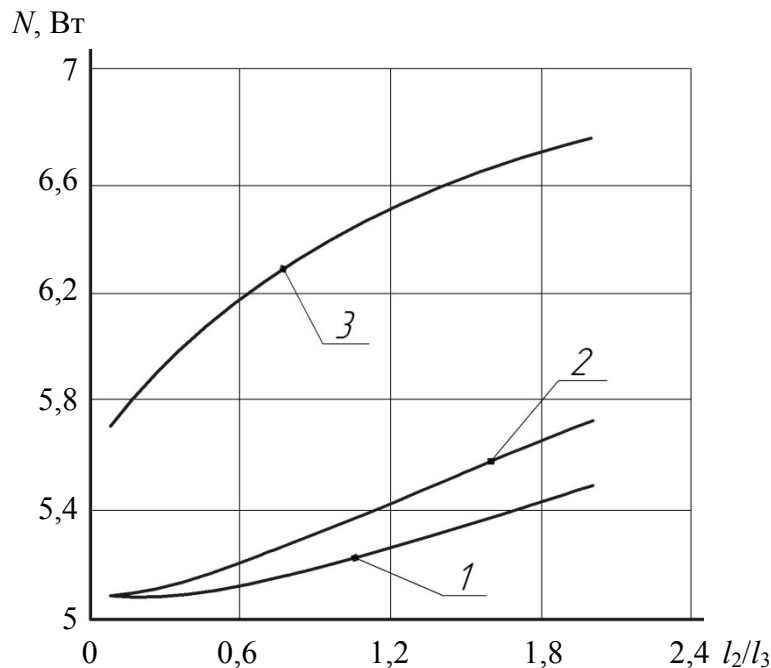


Рис. 2. График зависимостей потребляемой мощности МВВН от отношения l_2/l_3 при разных длинах первой ступени: 1 – $l_1 = 50$ мм; 2 – $l_1 = 100$ мм; 3 – $l_1 = 200$ мм

Fig. 2. Chart of dependency of power consumption MWN from the relationship l_2/l_3 at different lengths of the first stage: 1 – $l_1 = 50$ mm; 2 – $l_1 = 100$ mm; 3 – $l_1 = 200$ mm

Основная цель нашей работы состоит в теоретическом и экспериментальном исследовании энергетических характеристик молекулярно-вязкостных вакуумных насосов и определении возможности снижения мощности, требуемой для работы насоса.

Описание экспериментального стенда для определения энергетических характеристик МВВН

Для исследования откачных параметров молекулярно-вязкостных вакуумных насосов с различными проточными частями в широком диапазоне давлений разработан экспериментальный стенд [1], схема которого представлена на рис. 3.

Вакуумная установка состоит из напускной камеры CV1 и измерительной камеры CV2, изготовленных из нержавеющей стали с полированными внутренними поверхностями.

Между ними установлена диафрагма D известной проводимости для определения скорости действия МВВН.

В качестве локализованного источника напуска газа в камеру CV1 служит игольчатый натекаль VF, позволяющий регулировать газовые потоки. Равномерное распределение напускаемого потока по входному сечению обеспечивается кольцевой системой напуска, разработанной и исследованной на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ имени Н.Э. Баумана, или сеточным сепаратором. Такая система осуществляет подачу газовых потоков одновременно в нескольких точках поперечного сечения вакуумной камеры, при этом потоки равномерно распределены по поперечному сечению и равны между собой. Напускаемые потоки измеряются регулятором расхода газа РРГ-12.

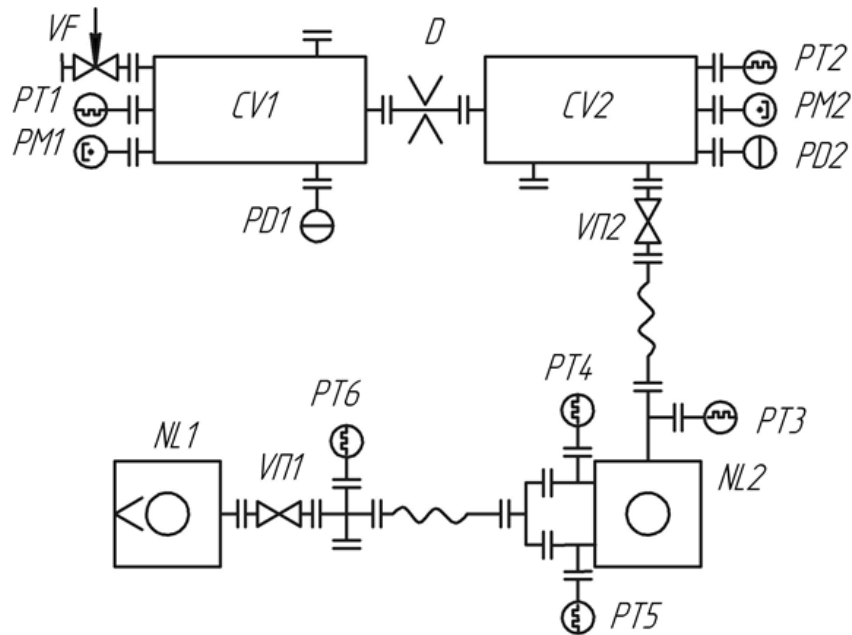


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментального стенда
 Fig. 3. Schematic diagram of the experimental stand

По своей природе асинхронный двигатель, используемый для привода насоса, является универсальным преобразователем, в котором происходит преобразование напряжения статора U_1 в напряжение ротора U_2 , частоты питания f_1 в частоту тока ротора f_2 , электрической мощности $N_{эл}$, потребляемой из сети, в механическую мощность $N_{мех}$, развиваемую двигателем.

Электрическая энергия, забираемая двигателем из сети, сначала преобразуется в энергию вращающегося магнитного поля, которое в основном сосредоточено в воздушном зазоре машины. Основная часть энергии магнитного поля преобразуется в механическую энергию на валу двигателя и идет на выполнение работы; оставшая, существенно меньшая часть энергии преобразуется в электрическую энергию, передаваемую в обмотку ротора, как во вторичную обмотку трансформатора, и идет на нагрев ротора. Она необходима для создания тока ротора, который участвует в формировании момента, развиваемого двигателем. На рис. 4 изображена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

При подключении обмотки статора асинхронного электродвигателя к сети трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле, угловая скорость ω_0 которого, называемая синхронной, находится по формуле

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n}, \quad (1)$$

где f_1 – частота переменного тока промышленной частоты, Гц; p_n – число пар полюсов двигателя, определяются по паспортным данным.

Синхронную угловую скорость в научнотехнической литературе также обозначают как ω_1 . Разность между ней и текущим значением угловой скорости ротора ω , отнесенная к скорости ω (ω_1), называется скольжением

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}. \quad (2)$$

Для двигательного режима $s = 1-0$, а мощность на валу двигателя составляет

$$N_{мех} = M \omega = N_{эм} (1-s). \quad (3)$$

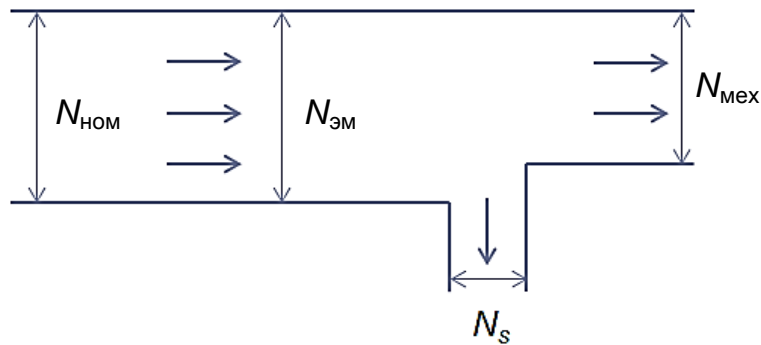


Рис. 4. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя
 Fig. 4. The energy diagram of the induction motor

Мощность электромагнитного поля:

$$N_{\text{ЭМ}} = M \omega_0. \quad (4)$$

Электрическая мощность, передаваемая в ротор:

$$N_s = M \omega_0 s. \quad (5)$$

Разность

$$N_{\text{ЭМ}} - N_{\text{мех}} = N_{\text{ЭМ}} s \quad (6)$$

дает тепловые потери в цепи ротора, которые пропорциональны скольжению. Максимальное значение КПД при этом составит

$$\eta = \frac{N_{\text{мех}}}{N_{\text{ЭМ}}} = \frac{N_{\text{ЭМ}}(1-s)}{N_{\text{ЭМ}}} = 1-s. \quad (7)$$

Определение мощности молекулярно-вязкостного вакуумного насоса

Поскольку величина максимального отношения давлений зависит от окружной скорости ротора, рабочая частота ротора МВВН определяется требуемыми откачными параметрами насоса. При диаметре ротора $58 \cdot 10^{-3}$ м максимальное отношение давлений для исследуемого насоса обеспечивается при окружной скорости ротора от 80 м/с (частота вращения ротора 26340 об/мин) до 274 м/с (частота вращения ротора 90000 об/мин) [8].

Так как колеса насоса работают в газовой среде (особенно при пуске насоса), необходимо увеличить его мощность на 10–15 % для увеличения момента трогания и сокращения

времени выхода ротора на рабочее число оборотов. В результате расчетная механическая мощность молекулярно-вязкостного вакуумного насоса определяется зависимостью

$$N = 1,1 \left(N_{\text{сж}} + N_{\text{гтр}} + N_{\text{п}} + N_{\text{ин}} + N_{\text{во}} \right) \text{Вт}, \quad (8)$$

где составляющие мощности, затрачиваются на сжатие газа в проточной части насоса ($N_{\text{сж}}$), на газодинамическое трение ($N_{\text{гтр}}$), на преодоление трения в подшипниковом узле ($N_{\text{п}}$), на преодоление сил инерции ($N_{\text{ин}}$) и для питания вспомогательного оборудования ($N_{\text{во}}$).

Мощность $N_{\text{сж}}$ определяется зависимостью

$$N_{\text{сж}} = L_{\text{из}} G = 2,3 s_{\text{н}} p_{\text{вс}} \lg \left(\frac{p_{\text{н}}}{p_{\text{вс}}} \right), \quad (9)$$

где G – массовый расход газа, кг/с; $L_{\text{из}}$ – изотермическая работа, Дж/кг; $s_{\text{н}}$ – быстрота действия насоса, м³/с; $p_{\text{вс}}$ – минимальное рабочее давление всасывания, Па; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – температура газа, К; $p_{\text{н}}$ – давление нагнетания газа, Па.

При нагнетании газа в атмосферу мощность $N_{\text{сж}}$ увеличивается (рис. 5) по отношению к мощности ТМН, давление нагнетания которого соответствует 1 Па. Так как МВВН работает в основном в диапазоне давлений от 1 до 10^5 Па, необходимо учитывать увеличение мощности $N_{\text{сж}}$ и $N_{\text{гтр}}$ за счет увеличения концентрации газа (сплошная среда) и влияния трения газа о поверхность каналов проточной части насоса.

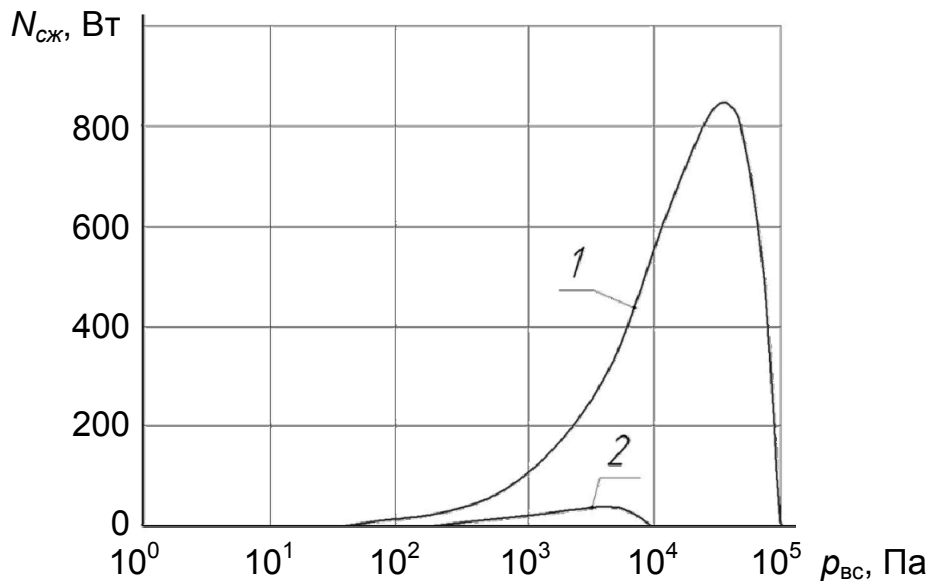


Рис. 5. Зависимость изотермической работы от давления всасывания при величинах давления нагнетания 10^5 (1) и 10^4 (2) Па

Fig. 5. The dependence of the isothermal operation of the suction pressure at values of the discharge pressure 10^5 (1) and 10^4 (2) Pa

В зависимости от типа подшипникового узла мощность, затрачиваемая на преодоление трения в нем [16], составляет от 50 до 150 Вт. Мощность, затрачиваемая на преодоление трения в подшипниковом узле, выражается зависимостью

$$N_{\text{п}} = \frac{10^{-7} M n}{9550}, \quad (10)$$

где M – момент трения в подшипнике, определяемый при высокой частоте вращения по следующей формуле:

$$M = 10^{-7} (vn)^{\frac{2}{3}} f_o D_{\text{срп}}^3. \quad (11)$$

Здесь v – кинематическая вязкость смазочного материала подшипника, $\text{мм}^2/\text{с}$; f_o – коэффициент, зависящий от типа подшипника и условий смазки; $D_{\text{срп}}$ – средний диаметр подшипника, м.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил инерции, определяется зависимостью

$$N_{\text{ин}} = \frac{\pi I n^2}{1800 t \eta_{\text{мех}}}, \quad (12)$$

где I – момент инерции ротора относительно оси вращения, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; n – частота вращения ротора, об/мин; t – время разгона ротора до рабочих числе оборотов, с; $\eta_{\text{мех}}$ – механический КПД.

Регулирование частоты вращения в асинхронном электродвигателе может осуществляться путем варьирования большего числа параметров (рис. 6).

Так как в качестве электропривода МВВН используется асинхронный высокочастотный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, его подключение к насосу осуществляется через муфту. При этом регулирование параметров двигателя выполняется преобразователем частоты (рис. 7). При экспериментальном определении механической мощности в исследуемом диапазоне частот вращения невозможно установить между насосом и двигателем дополнительные устройства (такие, как торсионный вал), поэтому вместо механической мощности производится замер электрической мощности.

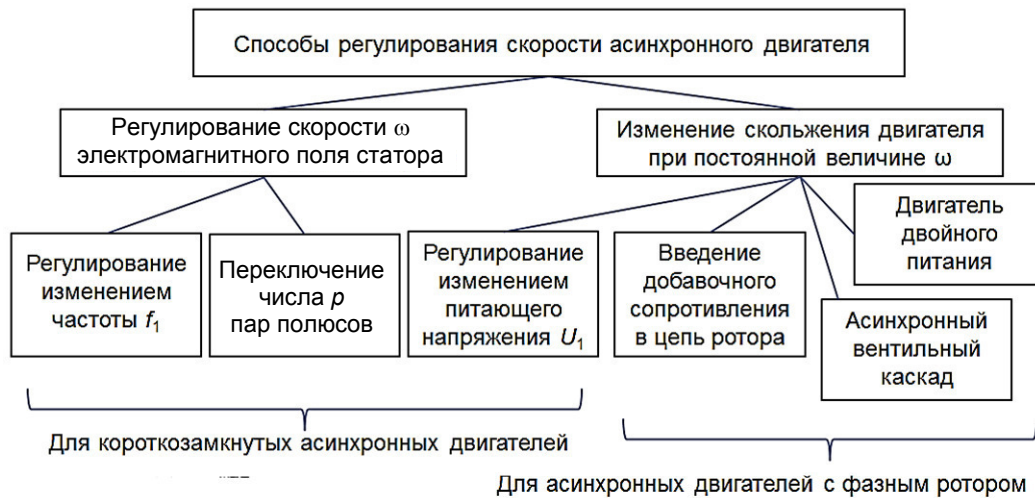


Рис. 6. Способы регулирования скорости асинхронного двигателя

Fig. 6. Methods of asynchronous motor speed control

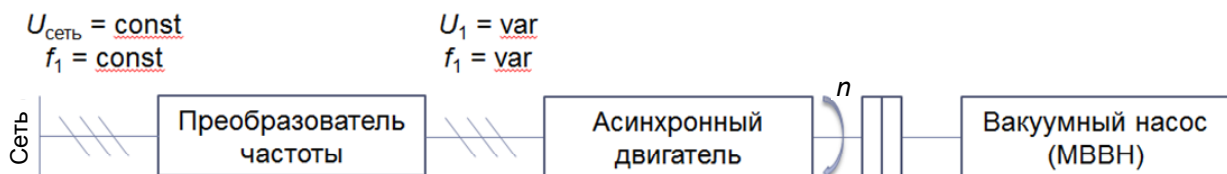


Рис. 7. Схема подключения электродвигателя к МВВН

Fig. 7. Wiring diagram of motor to MVVN

Заключение

В проведенном исследовании определены основные факторы, влияющие на величину мощности насоса и составляющие суммарной мощности.

Установлено, что часть расходуемой мощности (потребляемая на трение в подшипниковом узле, инерционный разгон вращающихся масс и питание вспомогательного оборудования) определяется конструкцией насоса и практически не изменяется в широком диапазоне давлений. Мощность, затрачиваемая на газодинамическое трение и сжатие газа в проточной части МВВН, для молекулярного режима незначительна, однако в молекулярно-вязкостном и вязкостном ре-

жимах течения газа она существенно возрастает.

Так как МВВН является новым типом вакуумных насосов, необходимо провести экспериментальное исследование энергетических характеристик насоса на разных режимах работы и в широком диапазоне давлений.

Основное направление исследований по снижению энергетических затрат привода МВВН – определение того, как изменяется мощность, требуемая для сжатия газа в молекулярно-вязкостном и вязкостном режимах течения газа, при перераспределении нагрузки в ступенях многоступенчатых МВВН, изменении длин проточных частей, изменении скоростей вращения роторов насоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свичкарь Е.В., Никулин Н.К., Демихов К.Е. Перспективы развития комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосов // Инженерный

журнал: наука и инновации. [Электронное научно-техническое издание]. 2013. № 5 (17). С. 1–15.

2. **Демихов К.Е.** Современные направления развития высоковакуумных механических насосов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2014. № 5. С. 3–11.
3. **Никулин Н.К.** Комбинированные ТМН. Вакуумная техника, материалы и технология» // Материалы IV Международной научно-технической конференции. Москва: Изд-во НОБЕЛЛА, 2009. С. 43–48.
4. **Хаблянян М.Х., Саксаганский Г.Л., Бурмистров А.В. [и др.]**. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч. 2 Вакуумные насосы / КНИТУ, 2016, 300 с.
5. **Демихов К.Е.** Оптимизация высоковакуумных механических насосов. LAP (Lambert Academic Publishing), 2013. 312 с.
6. **Giors S.** Solved and unsolved gas dynamics problems for turbomolecular drag pumps: an industrial overview // 64th IUVESTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology. 2011. P. 1–26. [Эл. ресурс]. Режим доступа: <http://www.iter.kit.edu> (дата обращения: 25.09.2018).
7. **Skovorodko P.A.** Some features of the flow in the Holweck pump / Institute of Thermophysics [Электр. ресурс]. Режим доступа: <http://arxiv.org> (дата обращения: 10.10.2015).
8. **Skovorodko P.A.** Continuum model for Couette–Poiseuille flow in a drag molecular pump // Institute of Thermophysics. [Эл. ресурс]. Режим доступа: <http://arxiv.org> (дата обращения 10.10.2015).
9. **Демихов К.Е., Очков А.А.** Универсальная математическая модель процесса откачки газа молекулярным вакуумным насосом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2017. № 5. С. 134–138
10. **Демихов К.Е., Очков А.А., Цекадзе Г.Т.** Метод расчета оптимальных параметров комбинированного молекулярного вакуумного насоса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2017. № 5. С. 98–99.
11. **Tsui Y.-Y., Kung C.-P., Cheng H.-P.** Analysis of the flow in the grooves of a molecular pump // Numerical Heat Transfer, Part A. 2001. 40:73 – 88. P. 73–88.
12. **Sharipov F.** Rarefied gas dynamics and its applications to vacuum technology // Prepared for Vacuum in Accelerators: Specialized Course of Conference: C06–05–16.1. P.1 – 13. [Эл. ресурс]. Режим доступа: <http://fisica.ufpr.br/> (дата обращения: 25.09.2018).
13. **Arpa R., Telib H., Cozza I.F., Campagna L., Emelli E.** A kinetic approach in modeling compact Siegbahn molecular stages: physical and numerical aspects // 64th IUVESTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology. 2011. P. 1–21.
14. **Бурмистров А.В., Райков А.А., Саликеев С.И.** Энергетические характеристики безмасляного кулачково-зубчатого вакуумного насоса // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 8 (15). С. 257–258.
15. **Антипов И.А.** Исследование энергетических характеристик многоступенчатого молекулярно-вязкостного вакуумного насоса // Сборник трудов I Всероссийской студенческой научно–практической конференции «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты». Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 182–186.
16. **Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. [и др.]**. Вакуумная техника: Справочник. /Ред. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. Москва: Машиностроение, 2009. 590 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЛЮЧАРОВ Владимир Сергеевич – инженер Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

E-mail: klyucharov@gmail.com

НИКУЛИН Николай Константинович – кандидат технических наук доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

E-mail: nikulinnk@gmail.com

СВИЧКАРЬ Елена Владимировна – кандидат технических наук доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

E-mail: svic@bk.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 21.09.2018



REFERENCES

- [1] **Svichkar Ye.V., Nikulin N.K., Demikhov K.Ye.** Perspektivy razvitiya kombinirovannykh turbomolekulyarnykh vakuumnnykh nasosov. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. Elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniye*. 2013. № 5(17). S. 1–15. (rus.)
- [2] **Demikhov K.E.** Current trends of high-vacuum mechanical pump. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Mechanical Engineering*. 2014. № 5. P. 3–11.
- [3] **Nikulin N.K.** Kombinirovannyye TMN. *Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya». Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Moskva: Izd-vo NOVELLA, 2009. S. 43–48. (rus.)
- [4] **Khablanyan M.Kh., Saksaganskiy G.L., Burmistrov A.V. [i dr.,]** Vakuumnaya tekhnika. Oborudovaniye, proyektirovaniye, tekhnologii, ekspluatatsiya. Ch. 2 Vakuumnnyye nasosy / KNITU. 2016. 300 s. (rus.)
- [5] **Demikhov K.Ye.** Optimizatsiya vysokovakuumnnykh mekhanicheskikh nasosov. LAMBERT Academic Publishing. 2013. 312 s. (rus.)
- [6] **Giors S.** Solved and unsolved gas dynamics problems for turbomolecular drag pumps: an industrial overview. *64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology*. 2011. P. 1–26. [El. resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.itep.kit.edu> (data obrashcheniya: 25.09.2018).
- [7] **Skovorodko P.A.** Some features of the flow in the Holweck pump / Institute of Thermophysics. [El. resurs]. Rezhim dostupa: <http://arxiv.org> (data obrashcheniya: 10.10.2015). (rus.)
- [8] **Skovorodko P.A.** Continuum model for Couette–Poiseuille flow in a drag molecular pump / Institute of Thermophysics. [El. resurs]. Rezhim dostupa: <http://arxiv.org> (data obrashcheniya 10.10.2015). (rus.)
- [9] **Demikhov K.E., Ochkov A.A.** Universalnaya matematicheskaya model protsessa otkachki gaza molekulyarnym vakuumnym nasosom. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Mechanical Engineering*. 2017. № 5. S. 134–138 (rus.)
- [10] **Demikhov K.E., Ochkov A.A., Tsekadze G.T.** Metod rascheta optimalnykh parametrov kombinirovannogo molekulyarnogo vakuumnogo nasosa. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Mechanical Engineering*. 2017. № 5. S. 98–99. (rus.)
- [11] **Tsui Y.-Y., Kung C.-P., Cheng H.-P.** Analysis of the flow in the grooves of a molecular pump. *Numerical Heat Transfer, Part A*. 2001. 40:73 – 88. P. 73–88.
- [12] **Sharipov F.** Rarefied gas dynamics and its applications to vacuum technology. *Prepared for Vacuum in Accelerators: Specialized Course of Conference: C06–05–16.1*. P. 1–13. Rezhim dostupa: <http://fisica.ufpr.br/> (data obrashcheniya: 25.09.2018).
- [13] **Arpa R., Telib H., Cozza I.F., Campagna L., Emelli E.** A kinetic approach in modeling compact Siegbahn molecular stages: physical and numerical aspects. *64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology*. 2011. P. 1–21.
- [14] **Burmistrov A.V., Raykov A.A., Salikeyev S.I.** Energeticheskiye kharakteristiki bezmaslyanogo kulachkovo-zubchatogo vakuumnogo nasosa. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012. № 8 (15). S. 257–258. (rus.)
- [15] **Antipov I.A.** Issledovaniye energeticheskikh kharakteristik mnogostupenchatogo molekulyarnoviazkostnogo vakuumnogo nasosa. *Sbornik trudov I Vserossiyskoy studencheskoy nauchno–prakticheskoy konferentsii «Vakuumnaya, kompressornaya tekhnika i pnevmoagregaty»*. Moskva: Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana, 2008. S. 182–186. (rus.)
- [16] **Demikhov K.E., Panfilov Yu.V. [i dr.,]** Vakuumnaya tekhnika: Spravochnik / Red. Demikhov K.Ye., Panfilov Yu.V. Moskva: Mashinostroyeniye, 2009, 590 s. (rus.)

THE AUTHORS

KLYUCHAROV Vladimir S. – *Bauman Moscow State technical university*

E-mail: klyucharov@gmail.com

NIKULIN Nikolay K. – *Bauman Moscow State technical university*

E-mail: nikulinnk@gmail.com

SVICHKAR Elena V. – *Bauman Moscow State Technical University*.

E-mail: svic@bk.ru

Received: 21.09.2018