

К. Е. Демихов, Н. К. Никулин,  
А. В. Дронов, Т. В. Дронова

## ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА И ОСЕВОГО ЗАЗОРА В РАБОЧЕМ КАНАЛЕ МОЛЕКУЛЯРНО- ВЯЗКОСТНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

*Приведены выходные характеристики молекулярно-вязкостного насоса с горизонтальным расположением рабочего диска. Определено оптимальное соотношение параметров для достижения наибольшей скорости действия насоса. Приведены зависимости осевого перемещения рабочего диска насоса и рабочие характеристики насоса от частоты вращения ротора.*

**E-mail:** koroleva@bmmstu.ru

**Ключевые слова:** вакуумный насос, рабочий диск, сила инерции, центробежная сила, осевое перемещение, оптимальное соотношение, откачная характеристика, рабочий канал.

**Исследование влияния центробежных сил на характеристики насоса.** Цель настоящей работы — исследование влияния центробежных сил при вращении на осевое перемещение рабочего диска и рабочие характеристики молекулярно-вязкостного вакуумного насоса; определение оптимального соотношения параметров диска для достижения наибольшей скорости действия насоса.

Молекулярно-вязкостный вакуумный насос (МВВН) с горизонтальным расположением рабочего диска имеет ряд преимуществ перед насосом барабанного типа. К таким преимуществам относятся относительно малые габаритные размеры и более высокая скорость действия при прочих равных условиях. К числу недостатков подобной конструктивной схемы следует отнести ряд дополнительных технологических условий при изготовлении и эксплуатации подвижных частей насоса. Главным образом, это поддержание необходимого значения осевого зазора, а также недопустимость заклинивания рабочего колеса при уменьшении осевого зазора ниже критического значения под действием центробежных сил при вращении на высоких частотах. Решение этой проблемы рассматривается на примере молекулярно-вязкостного вакуумного насоса (МВВН) с диаметром рабочего диска  $D = 120$  мм (рис. 1).

Высокая скорость вращения ротора насоса обуславливает появление в рабочем диске значительных центробежных сил. Вызванные ими напряжения распределяются симметрично относительно оси вращения диска. В качестве примера выбран цельный диск постоянной толщины (рис. 2).

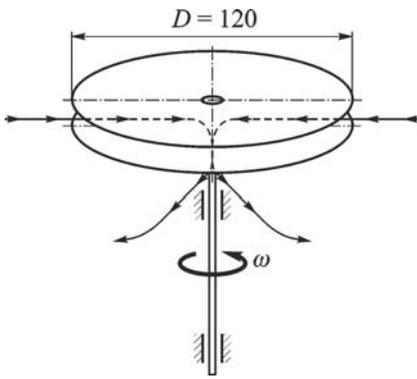


Рис. 1. Конструктивная схема МВВН с горизонтальным расположением рабочего диска

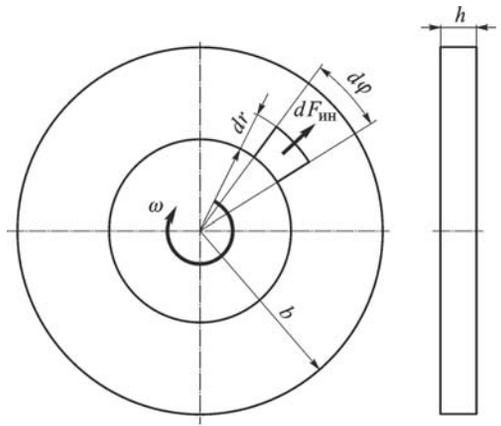


Рис. 2. Расчетная схема вращающегося диска

В работе было определено влияние данных напряжений на рабочий диск с геометрическими размерами  $b$  и  $h$ , вращающийся с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . При определении напряжения в диске используется принцип Д'Аламбера и в качестве внешних сил рассматриваются инерционные нагрузки, распределенные по объему диска. Для элемента объема  $hrd\varphi dr$  (см. рис. 2.) инерционная сила равна произведению массы  $\rho hrd\varphi dr$  на нормальное ускорение  $\omega^2 r$  [2]:

$$dF_{\text{ин}} = \rho h \omega^2 r^2 d\varphi dr, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность материала диска. Сила  $dF_{\text{ин}}$  по принципу Д'Аламбера направлена в сторону, противоположную ускорению;  $\sigma_r$  и  $\sigma_t$  — соответственно радиальное и окружное напряжения (рис. 3). Принимаем, что осевые силы и напряжения в данном случае отсутствуют. Уравнение равновесия с учетом влияния силы  $dF_{\text{ин}}$  имеет вид

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)hd\varphi - \sigma_r rhd\varphi - \sigma_t h dr d\varphi + \rho h \omega^2 r^2 d\varphi dr = 0. \quad (2)$$

После преобразования и интегрирования с учетом граничных условий (на внешнем контуре диска радиальное напряжение равно нулю  $\sigma_r(r=b) = 0$ ) выражения для максимальных радиального и окружного

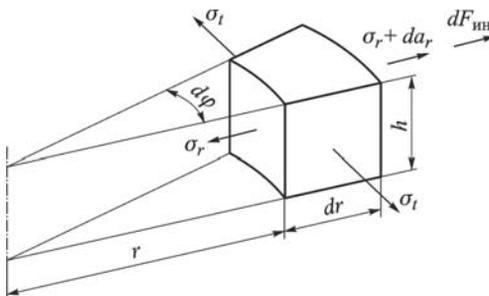


Рис. 3. Элемент вращающегося диска

напряжения примут вид (рис. 4) [3]

$$\sigma_r = \rho\omega^2(3 + \mu)b^2$$

и (3)

$$\sigma_t = \rho\omega^2(3 + \mu)b^2,$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуансона.

Рассчитывается влияние полученных напряжений на осевой зазор между роторным и статорным дисками. Исходные данные для расчета: материал — алюминиевый сплав АК6,  $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0,34$ ,  $E = 70 \text{ ГПа}$ ; диск —  $b = 0,06 \text{ м}$ ;  $\omega$  — переменная.

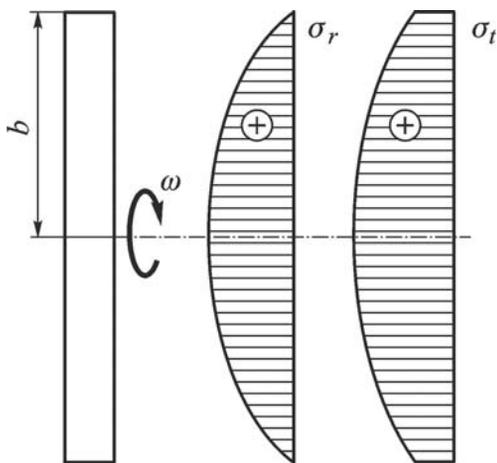


Рис. 4. Эпюры радиального и окружного напряжения

В результате расчетов при условии постоянства объема получена зависимость максимального осевого перемещения от частоты вращения (рис. 5).

В работе рассматривается влияние центробежных сил на модель рабочего диска с достаточной степенью приближения (рис. 6). При помощи компьютерного моделирования получена зависимость максимального осевого перемещения под влиянием центробежных сил на изгиб рабочего диска при вращении с различными частотами (рис. 7).

Напряжения, возникающие под действием центробежных сил при вращении, влияют на изменение осевого зазора в противоположных направлениях. Растягивающие напряжения увеличивают осевой зазор, а изгибающие — уменьшают его. Для определения итогового осевого перемещения учитывается влияние обоих явлений (рис. 8).

Как следует из полученных расчетных данных, осевое перемещение пропорционально частоте вращения рабочего диска. Если на низких частотах влияние на осевой зазор не столь существенно, то при

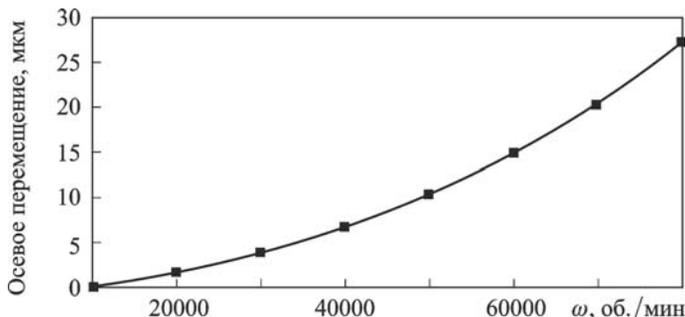


Рис. 5. Зависимость максимального осевого перемещения при радиальном удлинении от частоты вращения



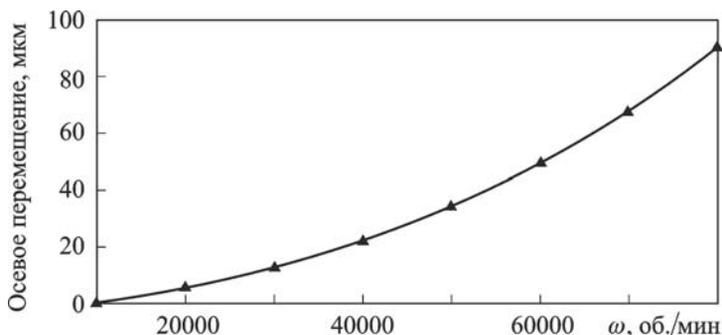
**Рис. 6. Точная геометрия модели рабочего диска (а) и модель его изгиба (б) под действием центробежных сил при высоких частотах вращения**

Представленные на рис. 9 расчетные данные получены посредством математического моделирования процессов, протекающих в рабочем канале МВВН, с использованием метода Монте-Карло при молекулярном режиме течения откачиваемого газа [1].

Рост быстроты действия насоса (см. рис. 9) за счет повышения частоты вращения рабочего диска вполне ожидаем. Изначально предполагалось, что эти две величины связаны в прямой пропорциональности. Однако при рассмотрении влияния прочих факторов, в частности влияния осевого зазора между рабочим и статорным диском, прямопропорциональная зависимость не столь очевидна. Как следует из рис. 9, быстрота действия насоса имеет тенденцию к снижению, по мере уменьшения осевого зазора, который в свою очередь зависит от изменения частоты вращения рабочего диска. При рассмотрении влияния обоих этих факторов, очевидно, что быстрота действия насоса ограничивается на том или ином участке диапазона изменения

увеличении частот вращения необходимо обращать особое внимание на уменьшение осевого зазора, ведь его уменьшение до критического значения может привести к заклиниванию рабочего диска и выход из строя всей конструкции. Влияние изменения осевого зазора также распространяется и на откачные характеристики насоса в целом.

Быстрота действия молекулярно-вязкостного вакуумного насоса подвержена изменению под влиянием нескольких факторов, например, таких как осевой зазор и частота вращения рабочего диска. Представ-



**Рис. 7. Зависимость максимального осевого перемещения при изгибе от частоты вращения**

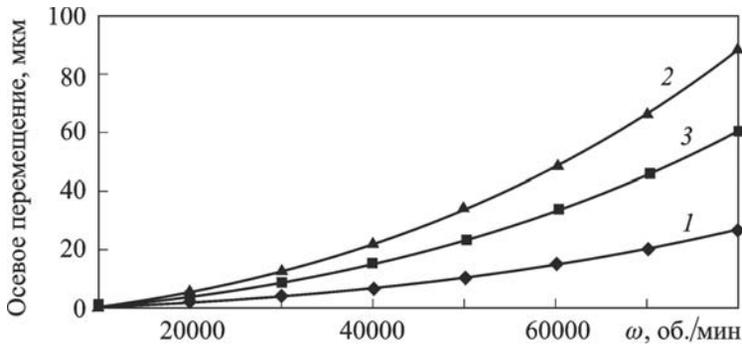


Рис. 8. Суммарное (3) осевое перемещение и его составляющие (1 — перемещение при радиальном удлинении, 2 — при изгибе) в зависимости от частоты вращения

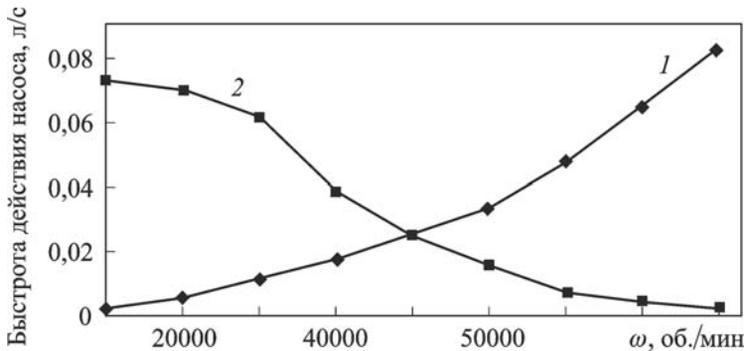


Рис. 9. Динамика изменения быстроты действия насоса (1) и осевого перемещения (2) в зависимости от частоты вращения

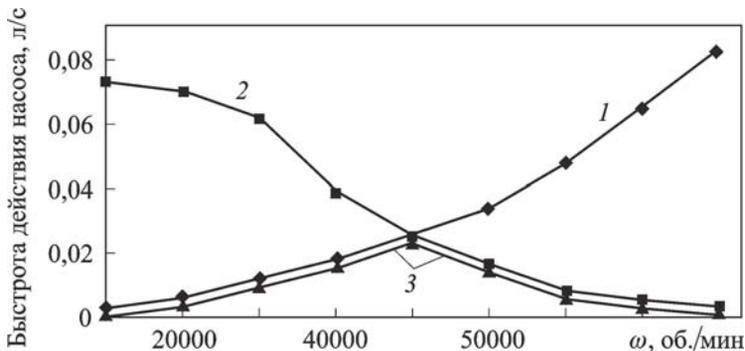


Рис. 10. Зависимость быстроты действия насоса от частоты вращения (1), осевого зазора (2) и обоих факторов (3)

частоты вращения рабочего диска одним из этих фактором. Следовательно, существует максимальное значение частоты вращения, при котором влияние обоих факторов уравновешено (рис. 10). Как видно из графиков, максимальное значение быстроты действия насоса на рассматриваемом диапазоне изменения частоты вращения дисков данного типа достигается при значении 45 000 об/мин, что соответствует касательной скорости  $u = 285$  м/с.

Результаты теоретического исследования показали зависимость осевого перемещения рабочего диска под действием центробежных сил при вращении. Также показан подход к расчету подобных перемещений и оценка их влияния на работу насоса. Определена зависимость быстроты действия насоса от частоты вращения под влиянием центробежных сил при вращении. Описан подход к определению оптимального соотношения факторов влияния для достижения наибольшей быстроты действия насоса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В а к у у м н а я техника: Справочник / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с.
2. К у р с теоретической механики. Учебник для технических вузов / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Лань, 1999. – 768 с.
3. С о п р о т и в л е н и е материалов. Учеб. для вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – М.: Высш. шк., 2001. – 560 с.

Статья поступила в редакцию 16.12.2009

Константин Евгеньевич Демихов — д-р. техн. наук, профессор, первый проректор — проректор по научной работе МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области вакуумной техники.

K.Ye. Demikhov — D. Sc. (Eng.), professor. First vice-rector — vice-rector on scientific work of the Bauman Moscow State Technical University, head of “Vacuum and Compressor Technology” department. Author of more than 150 publications in the field of vacuum technology.

Николай Константинович Никулин — канд. техн. наук, доцент кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области вакуумной техники.

N.K. Nikulin — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of vacuum technology.

Артем Вячеславович Дронов родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Аспирант кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы в области вакуумной техники.

A.V. Dronov (b. 1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2006. Post-graduate of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 1 publication in the field of vacuum technology.

Татьяна Викторовна Дронова родилась в 1982 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Аспирант кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы в области вакуумной техники.

T.V. Dronova (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2006. Post-graduate of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 1 publication in the field of vacuum technology.