



**ДЕМИХОВ**

Константин Евгеньевич  
доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой



**НИКУЛИН**

Николай Константинович  
кандидат технических  
наук, доцент кафедры



**СВИЧКАРЬ**

Елена Владимировна  
ассистент кафедры



**АНТИПОВ**

Иван Александрович  
учебный мастер кафедры  
«Вакуумная  
и компрессорная техника  
физических установок»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

## Измерение температуры проточной части молекулярно-вязкостного вакуумного насоса

**К.Е. Демихов, Н.К. Никулин,  
Е.В. Свичкарь, И.А. Антипов**

*Приведена методика измерения температуры проточной части безмаслянного молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в вязкостном и переходном режимах течения.*

**Ключевые слова:** характеристика, вакуум, насос, температура быстро вращающихся деталей, вязкостный режим течения, переходный режим течения.

*The article deals with the temperature calculation of the flow part of the oil-free molecular-viscous vacuum pump under the viscous and transient flow behavior.*

**Keywords:** characteristic, vacuum, pump, fast-rotating parts temperature, viscous flow behavior, transient flow behavior.

Создание безмасляной среды играет ведущую роль в ряде технологических процессов. Для таких процессов как напыление тонких пленок, выращивание кристаллов, получение чистых металлов, обработка космических аппаратов в наземных условиях и подобных, необходимо обеспечивать вакуум в диапазоне давлений  $1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^{-7}$  Па и ниже без загрязнения рабочих пространств следами рабочих тел систем откачки.

Средством откачки, которое удовлетворит таким требованиям, может стать молекулярно-вязкостный вакуумный насос (МВВН) [1], позволяющий обеспечить откачку объектов в диапазоне давлений от  $1 \cdot 10^5$  до  $1 \cdot 10^{-5}$  Па, а в составе комбинированного насоса —  $1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^{-8}$  Па и ниже. Работа МВВН наиболее эффективна в диапазоне вязкостного и переходного режимов течения газов.

Конструктивная схема МВВН представляет собой следующее: на смежных поверхностях статора и ротора выполнена винтовая нарезка специального профиля, которая обеспечивает перемещение газа со стороны всасывания на сторону нагнетания. Направление каналов на роторе и статоре противоположно друг относительно друга.

При попадании молекулы в канал, расположенный на роторе, она получает приращение кинетической энергии за счет вращения ротора. Затем молекула, переместившись в канал статора, получает приращение потенциальной энергии. Это обусловлено наличием трения газа в канале статора. Помимо приращения потенциальной энергии часть кинетической энергии тратится на повышение температуры газа, таким образом, данная часть энергии газа теряется, что отрицательно

сказывается на откачных характеристиках насоса [2].

Течение газа в проточной части МВВН определяется взаимодействием газа с поверхностью. Для того чтобы улучшить откачную характеристику МВВН необходимо выявить влияние различных параметров на течение газа в проточной части. Одним из таких параметров является температура газа в проточной части насоса.

До настоящего времени, практически все процессы в переходном режиме течения газа описываются на основании экспериментальных данных [3–5]. Важнейшим параметром, характеризующим энергетические характеристики насосов, служит температура газа и рабочих поверхностей. В рассматриваемом насосе основным рабочим элементом является ротор, вращающийся с большой частотой (десятки тысяч оборотов в минуту). В настоящее время именно измерение температуры быстровращающихся деталей является чрезвычайно сложной проблемой. Поэтому далее описана схема системы определения для измерения температуры газа и быстровращающихся частей деталей [6].

В форвакуумной полости выполняются технологические отверстия в которых устанавливаются термопары и пирометры. На входе в проточную часть насоса измеряется температура газа и температура поверхности ротора. В качестве датчиков давления используются тепловые преобразователи давления типа ПМТ-4М.

Измерения температуры проточной части МВВН проводится на экспериментальной модели (рис. 1) в двух точках насоса — на входе в проточную часть и на ее выходе при одновременном замере температуры газа соответственно. Один пирометр установлен в корпус насоса и уплотнен прокладкой из фторопласта. Насос представляет собой двухпоточную машину, что позволяет менять положение пирометра. Второй пирометр установлен во всасывающей полости насоса.

Измерение температур проводится с помощью инфракрасного пирометра IN 520-N и термопарных датчиков. Объектив пирометра с геометрическими параметрами и схемой для

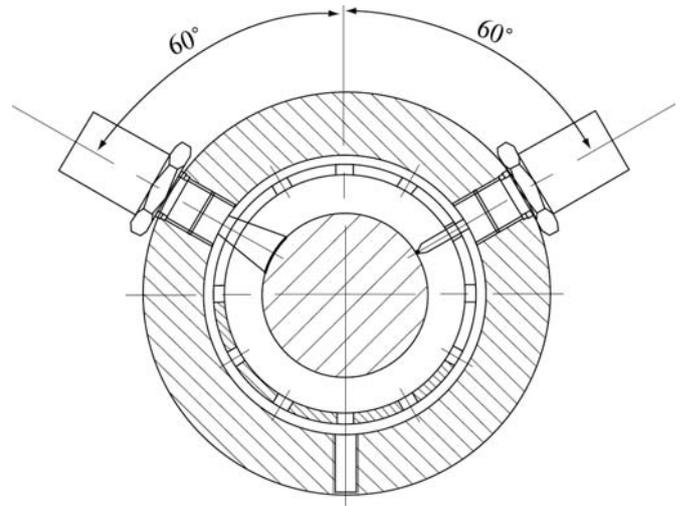


Рис. 1. Схема расположения датчиков для замера температуры ротора



Рис. 2. Объектив пирометра

определения размеров области измерения представлен на рис. 2.

Стационарные пирометры IN 520-N предназначены для бесконтактного измерения температуры объектов с неметаллическими поверхностями или металлическими поверхностями с покрытием (окрашенными, анодированными). Они оснащены на заводе-изготовителе объективом и кабелем для подключения к пирометру, рассчитанным на эксплуатацию при максимальной температуре окружающего воздуха 180 °С без охлаждения.

Область измерения с помощью инфракрасного пирометра IN 520-N (далее пятно), обеспечивающая паспортную точность, рассчитывается по эмпирической зависимости для паспортных данных

$$D = 5 + 0,085x,$$

где  $D$  — диаметр пятна;  $x$  — расстояние от объектива до объекта измерения.

Расстояние от объектива до ротора насоса в месте замера изменяется от 5 до 10 мм, соответственно необходимый диаметр пятна изменяется от 5,5 до 5,9 мм.

На реальном объекте пятно располагается на цилиндрической поверхности и границы пятна удалены от плоскости объектива больше, чем центр на величину  $\delta x$ :

$$\delta x = R \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{D}{2R} \right)^2} \right),$$

где  $R$  — радиус цилиндрической поверхности.

Результаты расчета отклонения  $\delta x$  от расстояния  $x$  до поверхности представлены на рис. 3. Результаты расчета показали, что величина  $\delta x$  составляет пренебрежимо малую величину по сравнению с  $x$  — около 1 %. Процесс калибровки пирометра для рабочих условий экспериментальной модели проводится по калиброванной термопаре. Для замера рабочей температуры поверхности ротора снимаются показания пирометра для семи различных положений ротора (ротор поворачивается на угол  $\sim 51^\circ 30'$ ). По семи отсчетам определяется средняя температура, регистрируемая пирометром  $T_{\pi}$  и одновременно термопарным датчиком  $T_T$ .

Разность  $\delta T_c = T_T - T_{\pi}$  служит поправкой к показаниям пирометра и регистрируемая температура при неподвижном роторе

$$T = T_{\pi} + \delta T_c.$$

Измерения температуры вращающегося ротора (частота вращения 24 000...75 000 об/мин) выполняются на семи частотах: 24 000, 32 000, 40 000, 48 000, 56 000, 62 000 и 72 000 об/мин. Проводится по семь отсчетов показаний пирометра для установившегося режима (изменение показаний не более 3% в течение 15 мин) на ка-

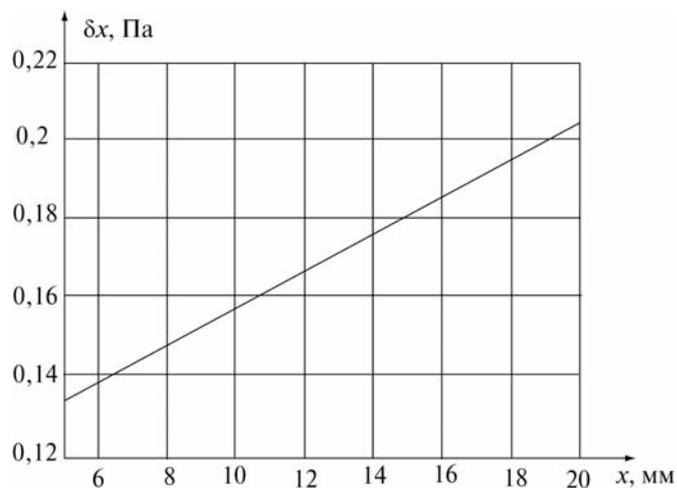


Рис. 3. Зависимость отклонения  $\delta x$  от расстояния  $x$  до поверхности

ждой частоте вращения. После измерения температуры  $T_{\pi}$  пирометром для определенной частоты вращения  $i$  ротор останавливают и перемещают термопару до контакта с ротором и замеряют его температуру  $T_T$  термопарным датчиком. Причем, сила прижатия термопары к поверхности ротора поддерживается постоянной при помощи постоянной деформации пружины, жестко соединенной с термопарой. Градуировочная кривая термопары (зависимость ТЭДС в мВ от температуры  $T_T$  спая в градусах Цельсия) платинородий—платина при температуре свободного конца  $0^\circ\text{C}$  изображена на рис. 4.

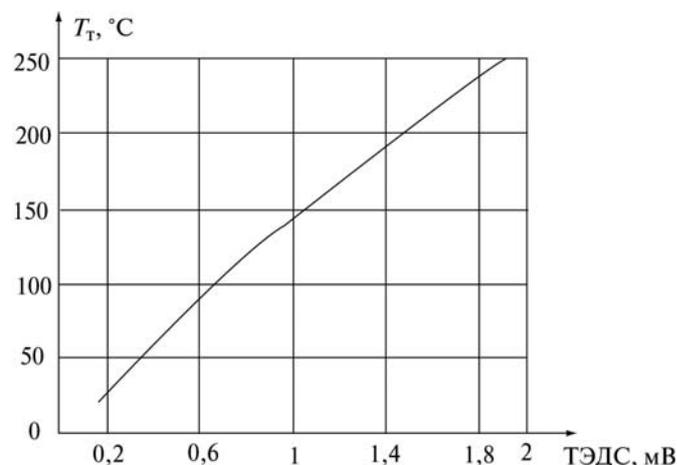


Рис. 4. Градуировочная характеристика термопарного датчика

Разность показаний пирометра и термопарного датчика определяется для всех семи частот в диапазоне температур 20...120 °С и вычисляется поправка на частоту вращения при одной и той же температуре

$$\delta T_i = T_{\tau} - T_{\text{пи}}.$$

Соответственно температура измеряемой поверхности по показаниям пирометра при данной частоте вращения

$$T = T_{\text{пи}} + \delta T_i.$$

Интерполируя  $\delta T_i$  для всего диапазона частот вращения ротора, определяется температура его поверхности по показаниям пирометра.

При измерении температуры газа на входе и выходе проточной части насоса во всасывающую и нагнетательную полости вмонтирована металлическая пластинка, площадь поверхности которой больше области измерения пирометра, в данном случае квадратная пластинка со стороной  $9 \cdot 10^{-6}$  м.

Толщина и расположение пластины выбирается из условий минимального возмущения потока. Температура пластины соответствует температуре окружающей среды и измеряется с помощью термопары, постоянно подсоединенных к пластине, и контролируется пирометром.

При работе вакуумного насоса в молекулярном режиме течения температура газа не изме-

ряется, так как температура пластины определяется в этом случае температурами окружающих поверхностей за счет лучистого теплообмена и не характеризует температуру газа. При вязкостном течении газа в безрасходном режиме работы насоса (режим максимального отношения давлений) температура пластинки соответствует температуре окружающего газа.

#### Литература

1. Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Модель молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в условиях низкого вакуума // Конверсия в машиностроении. 2007.
2. Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Расчет откачной характеристики МВВН в вязкостном режиме течения. Сб. трудов I Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты». М., 2008. С. 128–139.
3. Никулин Н.К., Антипов И.А. Энергетические характеристики комбинированных турбомолекулярных насосов», «Будущее машиностроения России // В сб. тр. всерос. конф. молодых ученых и специалистов/ Московский Государственный Технический Университет МГТУ им. Н.Э.Баумана. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. 332 с.
4. Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
5. Демихов К.Е., Никулин Н.К. Обобщенная методика расчета кинетических высоковакуумных насосов», «Будущее машиностроения России» // В сб. тр. всерос. конф. молодых ученых и специалистов/ Московский Государственный Технический Университет МГТУ им. Н.Э.Баумана. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. 332 с.
6. Никулин Н.К., Антипов И.А. Исследование энергетических характеристик многоступенчатого молекулярно-вязкостного насоса // Сб. трудов I Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты». М., 2008. С. 181–186.

Статья поступила в редакцию 19.09.2011