

Исследование энергетических затрат в механическом вакуумном насосе

Н.К. Никулин, Е.В. Свичкар, В.С. Ключаров
Москва, МГТУ им. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
E-mail: svic@bk.ru

Одним из важных параметров вакуумных насосов является энергетическая характеристика, определяющая изменение мощности двигателя в зависимости от времени выхода на режим, геометрических и скоростных параметров. Изменение указанных параметров при проектировании насоса позволяет понизить мощность электродвигателя, влияя на стоимость системы, и позволяет работать в условиях ограниченного энергопотребления, например в космических аппаратах.

A study of energy costs in the mechanical vacuum pump. N.K.Nikulín, E.V.Svichkar, V.S.Klyucharov. One of the important parameters of vacuum pumps is the energy characteristic, which determines the change in engine power depending on the time of entering the mode, geometric and speed parameters. Changing these parameters in the design of the pump allows us to reduce the power of the electric motor, affecting the cost of the system, and allows us to work in conditions of limited energy consumption, for example in spacecraft.

Актуальность совершенствования существующих и создания новых средств откачки

Одна из наиболее актуальных задач развития и совершенствования вакуумных систем заключается в обеспечении безмасляности технологического процесса, что достигается использованием вакуумного оборудования соответствующего данному условию. В связи с чем 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. Параллельно с совершенствованием конструкций вакуумных насосов выполняется улучшение и расширение диапазонов откачных параметров насосов. Для этого в комбинированные турбомолекулярные вакуумные насосы устанавливаются дополнительные форвакуумные ступени, как правило, молекулярные, вихревые и молекулярно-вязкостные проточные части [1]. В результате в последних колесах турбомолекулярной проточной части снижена вероятность нарушения молекулярного режима течения газа, увеличен диапазон рабочих давлений всего насоса, увеличено давление газа в форвакуумной области, что позволяет снизить требования к форвакуумной системе откачки. Наиболее часто производителями комбинированных ТМН используются молекулярные проточные части, которые могут работать не только в молекулярном, но и молекулярно-вязкостном режимах течения газа.

Создание новых типов вакуумных насосов, к которым можно отнести молекулярно-вязкостные вакуумные насосы (МВВН) [4], состоящие 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] 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. Вследствие доработки существующих конструкций насосов и создании новых насосов, необходимо разрабатывать новые методы расчета основных параметров насосов и получать экспериментальное подтверждение полученных данных.

Энергетические характеристики вакуумных насосов

Одним из важных параметров вакуумных насосов является его энергетическая характеристика [2, 3], определяющая изменение мощности двигателя вакуумного насоса в зависимости от времени выхода на режим, геометрических и скоростных параметров насоса. Изменение указанных параметров при проектировании вакуумного насоса позволяет понизить мощность электродвигателя и энергозатраты всей вакуумной системы, что позволит не только уменьшить стоимость системы, но и работать в условиях ограниченного энергопотребления, например в космических аппаратах.

Как показано в работе [2] работа МВВН в диапазоне давлений от 10 Па до 10^5 Па при окружной скорости на роторе 150 – 180 м/с приводит к чрезвычайно большим затратам мощности (рис 1). Для уменьшения потребляемой мощности необходимо перераспределять скорости движения ступеней, уменьшая ее по мере увеличения давления, что достигается применением ступеней с различными величинами диаметров. Основная нагрузка приходит 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.

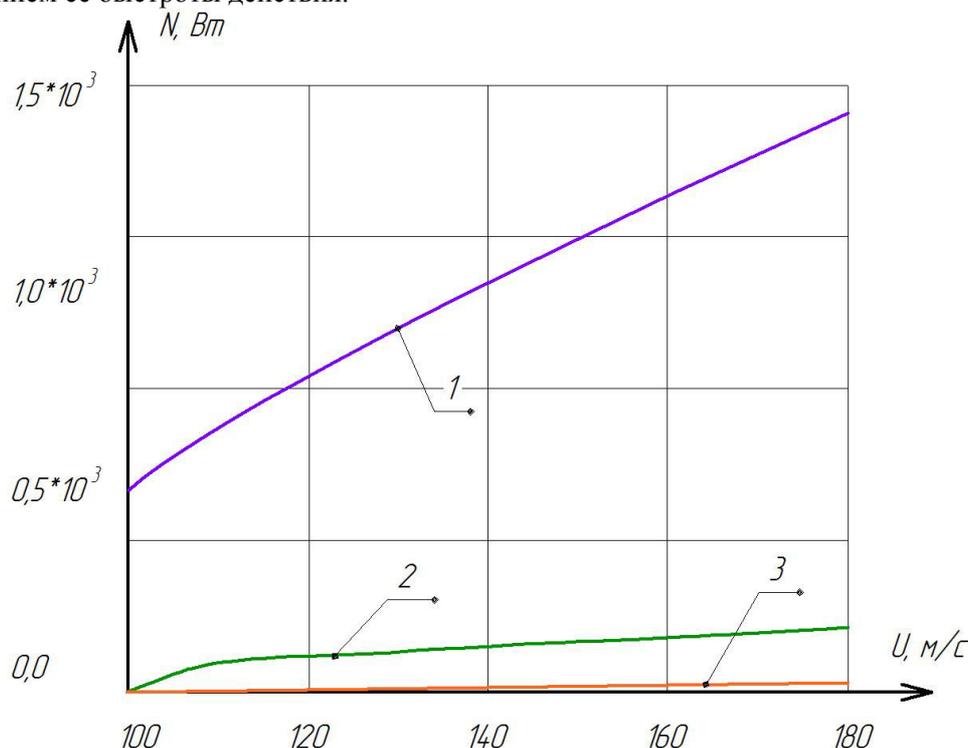


Рис. 1. Зависимость мощности потребляемой ступенью МВВН в зависимости от окружной скорости движения ротора.

1 – при давлении в ступени 10^5 Па; 2 – при давлении в ступени 10^4 Па;
3 – при давлении в ступени 10^3 Па.

К тому же согласно данным работы [4] на изменение потребляемой мощности влияет длина ступени. По данным рис. 2 можно сказать, 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.

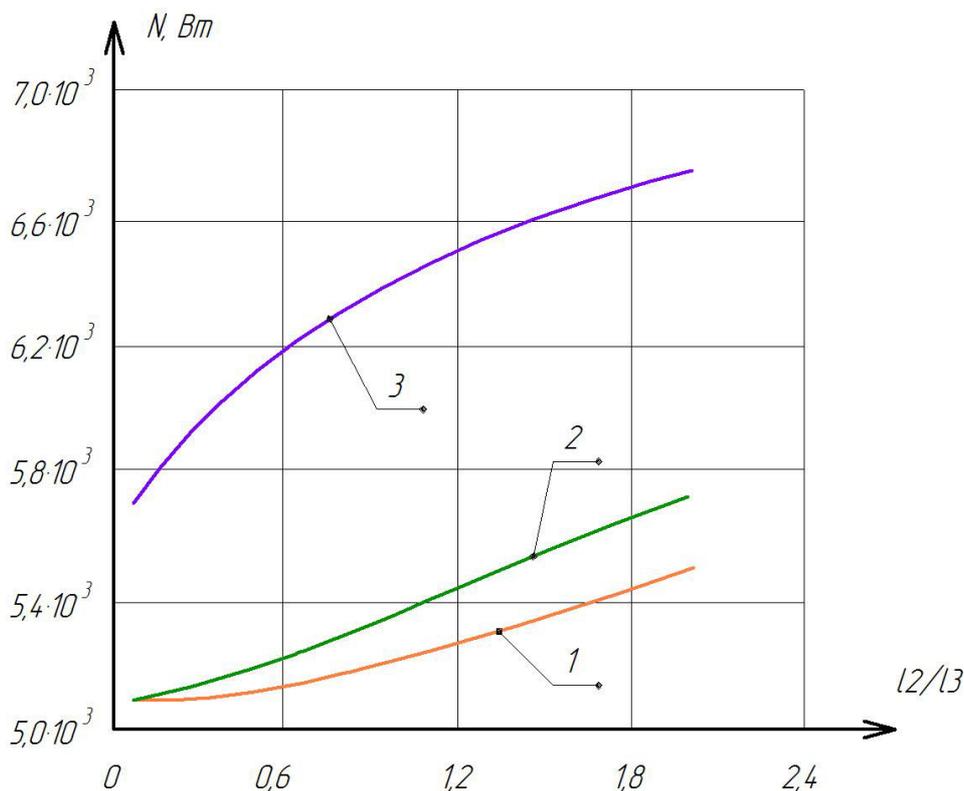


Рис. 2. График зависимостей потребляемой мощности МВВН от отношения l_2/l_3 при разных длинах первой ступени.
 $1 - l_1 = 50$ мм; $2 - l_1 = 100$ мм; $3 - l_1 = 200$ мм.

В работе [3] 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 авторами не приводится.

Ведущие производители турбомолекулярных и диффузионных вакуумных насосов, которые, как и МВВН относятся к перекачивающим насосам, не публикуют полные данные по энергетическим характеристикам своих изделий. Цифровое значение мощности по каталогам может не включать максимальную выходную мощность, а на близкие по параметрам насосы одного производителя могут указываться одинаковые показатели выходной электрической мощности. При этом в рамках класса вакуумных насосов, мощности по каталогам различных производителей носят близкий характер. В связи с чем, можно говорить о сравнимости энергетических характеристик.

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

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, схема которого представлена на рис. 3.

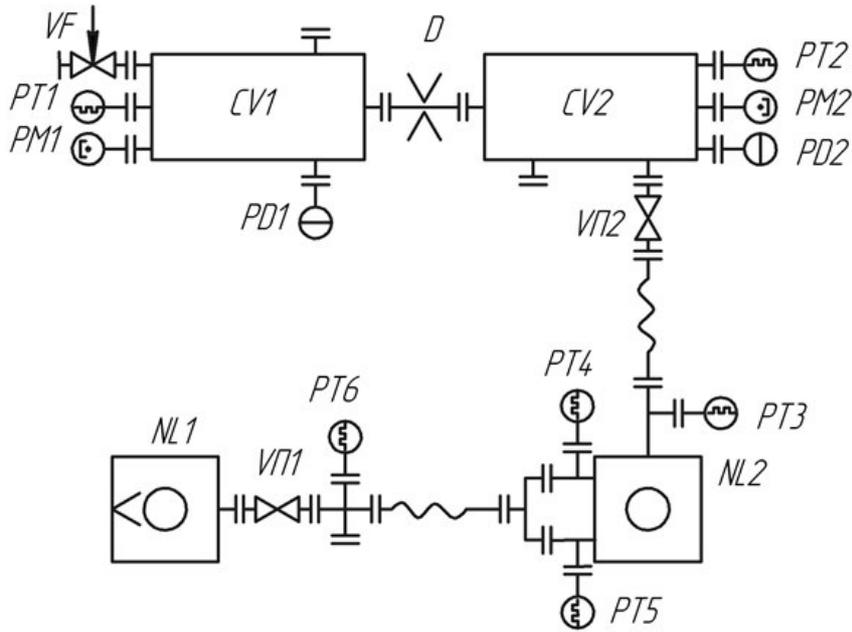


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментального стенда.

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 быстроты действия МВВН.

В качестве локализованного источника напуска газа в камеру CV1 служит игольчатый напекатель VF, позволяющий регулировать газовые потоки. Равномерное распределение напускаемого потока по входному сечению обеспечивается кольцевой системой напуска, разработанной и исследованной на кафедре Э–5 «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. 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.

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 [5].

Электрическая энергия, забираемая двигателем из сети, сначала преобразуется в энергию вращающегося магнитного поля, которое в основном сосредоточено в воздушном поле машины. Основная часть энергии магнитного поля преобразуется в механическую энергию на валу двигателя и идет на выполнение работы, остальная, существенно меньшая часть энергии, преобразуется в электрическую энергию передаваемую в обмотку ротора как во вторичную обмотку трансформатора, эта энергия 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.

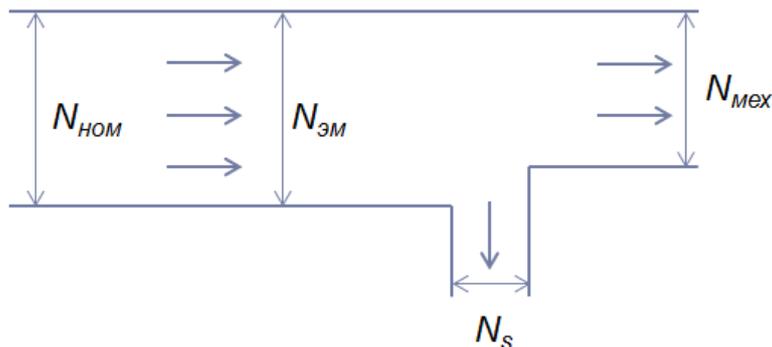


Рис. 4. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

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

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p_n}$$

где f_1 – частота переменного тока промышленной частоты, Гц;

p_n – число пар полюсов двигателя, которые определяются из паспортных данных.

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

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}$$

Для двигательного режима $S = 1 \dots 0$ мощность на валу двигателя составляет

$$N_{\text{мех}} = M \cdot \omega = N_{\text{эм}} \cdot (1 - S).$$

Мощность электромагнитного поля

$$N_{\text{эм}} = M \cdot \omega_0.$$

Электрическая мощность, передаваемая в ротор

$$N_S = M \cdot \omega_0 \cdot S,$$

а разность

$$N_{\text{эм}} - N_{\text{мех}} = N_{\text{эм}} \cdot S$$

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

$$\eta = \frac{N_{\text{мех}}}{N_{\text{эм}}} = \frac{N_{\text{эм}} \cdot (1 - S)}{N_{\text{эм}}} = 1 - S.$$

Определение мощности молекулярно-вязкостного вакуумного насоса

Так как величина максимального отношения давлений зависит от окружной скорости ротора, рабочая частота вращения 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).

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

$$N = 1,1(N_{сж} + N_{г.тр} + N_n + N_{ин} + N_{в.о.}),$$

где $N_{сж}$ – мощность, затрачиваемая на сжатие газа в проточной части насоса, Вт;
 $N_{г.тр}$ – мощность, затрачиваемая на газодинамическое трение, Вт;
 N_n – мощность, затрачиваемая на преодоление трения в подшипниковом узле, Вт;
 $N_{ин}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил инерции, Вт;
 $N_{в.о.}$ – мощность, необходимая для питания вспомогательного оборудования, Вт.

Мощность $N_{сж}$, затрачиваемая на сжатие газа в проточной части насоса, определяется зависимостью

$$N_{сж} = L_{из} \cdot G = 2,3S_n p_{вс} \lg\left(\frac{p_n}{p_{вс}}\right)$$

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

При нагнетании газа в атмосферу мощность $N_{сж}$ увеличивается по отношению к мощности ТМН, давление нагнетания которого соответствует 1Па. Так как МВВН работает в основном в диапазоне давлений от 1 Па до 10⁵Па, необходимо учитывать увеличение мощности $N_{сж}$ и $N_{г.тр}$ за счет увеличения концентрации газа (сплошная среда) и влияния трения газа о поверхности каналов проточной части насоса.

В зависимости от типа подшипникового узла мощность [6], затрачиваемая на преодоление трения в нем, составляет от 50 до 150 Вт. Мощность, затрачиваемая на преодоление трения в подшипниковом узле, определяется зависимостью

$$N_n = \frac{10^{-7} M \cdot n}{9550},$$

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

$$M = 10^{-7} (\nu \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot f_o \cdot D_{ср.п}^3,$$

ν – кинематическая вязкость смазочного материала подшипника, мм²/с;

f_o – коэффициент, зависящий от типа подшипника и условий смазки;

$D_{ср.п}$ – средний диаметр подшипника, м.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил инерции, определяется зависимостью

$$N_{ин} = \frac{\pi \cdot I \cdot n^2}{1800 \cdot t \cdot \eta_{мех}},$$

где I – момент инерции ротора относительно оси вращения, кг·м²;

n – частота вращения ротора, об/мин;

t – время разгона ротора до рабочих числе оборотов, с;

$\eta_{мех}$ – механический КПД.

Регулирование частоты вращения в асинхронном электродвигателе может осуществляться путем варьирования большего числа параметров (рис. 5).



Рис. 5. Способы регулирования скорости асинхронного двигателя.

Так как в качестве электропривода МВВН используется асинхронный высокочастотный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, схема подключения электродвигателя к насосу осуществляется через муфту. При этом регулирование параметров двигателя выполняется преобразователем частоты (рис. 6). Для экспериментального определения механической мощности в исследуемом диапазоне частот вращения невозможно установить между насосом и двигателем дополнительные устройства (такие как, торсионный вал), поэтому производится замер электрической мощности вместо механической мощности.

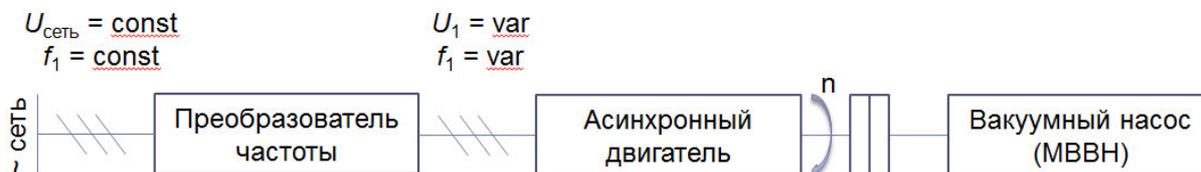


Рис. 6. Схема подключения электродвигателя к МВВН.

Заключение

По проведенному исследованию определены основные факторы, влияющие на величину мощности насоса и составляющие суммарной мощности.

Установлено, что:

- часть расходуемой мощности (потребляемой 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 не значительна, однако в молекулярно-вязкостном и вязкостном режимах течения газа 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.

Основным направлением работы по снижению энергетических затрат привода МВВН является определение зависимости изменения мощности, требуемой для сжатия газа в молекулярно-вязкостном и вязкостном режимах течения газа, за счет:

1. перераспределения нагрузки в ступенях многоступенчатых МВВН;
2. изменения длин проточных частей;
3. изменения скоростей вращения роторов насоса.

Литература

1. Демихов К.Е., Никулин Н.К. Расчет комбинированных турбомолекулярных высоковакуумных насосов. *Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение*, 2001, №3, с. 23-28.
2. Демихов К.Е., Никулин Н.К. Энергетические характеристики молекулярновязкостного вакуумного насоса. *Конверсия в машиностроении*, 2002, № 1, с. 18 – 20.
3. 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.
4. Антипов И.А., Никулин Н.К. Исследование энергетических характеристик многоступенчатого молекулярно-вязкостного вакуумного насоса. *Сборник трудов I Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты»*. М.: МГТУ, 2008, с. 182 – 186.
5. Романов А.В. *Электрический привод: Курс лекций*. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2006, 143 с.
6. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. и др. *Вакуумная техника: Справочник*. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. ред. М.: Машиностроение, 2009, 590с.
7. Официальный сайт компании АО «Atlas Copco» URL:<https://www.atlascopco.com> (дата обращения: 15.04.2018).

Модульная вакуумно-термическая установка для пиролитического разложения этанола

***С.П.Бычков, Е.А. Зикий, О.В. Огнев, Ю.В. Панфилов, *Ю.М. Саранулов, *М.С. Сиrotский
Москва, ФГБОУВО МГТУ им Н.Э. Баумана, ул.2-я Бауманская, д.5, bychkov@bmstu.ru
* Брянск, АО НПО «Спецэлектромеханика», ул. Карачижская, д. 79, sem-bf@semgroup.ru***

Рассмотрены возможности применения модульной вакуумно-термической установки для проведения процессов пиролитического разложения газов. Проведены расчет температур поверхностей рабочей камеры на основе разработанной математической модели. Установка является совместной разработкой кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана и АО НПО «Спецэлектромеханика» (г. Брянск).

Modular vacuum-thermal unit for pyrolytic decomposition of ethanol. S.P.Bychkov, E.A.Zickiy, O.V.Ognev, Y.V.Panfilov, Y.M.Sarapulov, M.S.Sirotskiy. The possibilities of using a modular vacuum-thermal unit for pyrolytic decomposition of gases are considered. The working chamber surface temperature is calculated on the basis of the developed mathematical model. This unit is a joint work of the department МТ-11 "Electronic technologies in mechanical engineering" (BMSTU, Moscow) and NPO "Spetsselektromekhanika" (Bryansk).

В результате сотрудничества кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана и АО НПО «Спецэлектромеханика» (г.Брянск) была спроектирована и изготовлена лабораторная модульная вакуумно-термическая установка (МВТУ) для реализации технологических процессов в вакууме в условиях локального распределения температур в рабочей камере, позволяющая получать достаточно высокую температуру на обрабатываемой подложке при холодных стенках камеры. Это делает