

**ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СЖАТИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗМАСЛЯНОГО СПИРАЛЬНОГО
ВАКУУМНОГО НАСОСА**

А.А. РАЙКОВ*, А.В. БУРМИСТРОВ*, С.И. САЛИКЕЕВ*, Е.Н. КАПУСТИН**

***Казанский национальный исследовательский технологический университет**

****ОАО Вакууммаш**

С использованием математической модели проведен анализ влияния параметров концевой части спирального вакуумного насоса на его энергетические характеристики. Рассчитаны зависимости индикаторной мощности от давления на входе в насос при различном количестве витков спирали и продолжительности сжатия. Показано, что увеличение продолжительности сжатия не приводит к значительному увеличению индикаторной мощности в области высоких давлений, но снижает мощность в области низких давлений.

Ключевые слова: спиральный насос, безмасляный вакуум, концевой участок, сжатие газа, индикаторная мощность, откачные характеристики, продолжительность сжатия.

подавляющее большинство высокотехнологичных процессов протекают в условиях вакуума. При этом обеспечить качество продукции или чистоту научного эксперимента возможно лишь в условиях обеспечения безмасляной среды.

Вакуумный насос спирального типа является одним из немногочисленных представителей средств откачки безмасляного типа с остаточным давлением уровня 1 Па. Данный тип машины выпускается практически всеми ведущими производителями вакуумного откачного и компрессорного оборудования. К сожалению в России потребность в безмасляных средствах средневакуумной откачки полностью покрывается импортным откачным оборудованием таких фирм как «Anest Iwata» (Япония), «Edwards» (Великобритания), «Varian Vacuum Technologies» (США) и др [1–3].

Создание производства спиральных вакуумных насосов в России позволит резко сократить или отказаться от импорта откачного оборудования и создаст предпосылки для освоения выпуска других видов вакуумных насосов и агрегатов, например, кулачково-зубчатых или винтовых. Очевидно меньшая, по сравнению с импортными аналогами, цена насоса позволит снизить затраты потребителей вакуумной техники. Освоение выпуска спиральных вакуум-насосов существенно повысит престиж России на рынке высокотехнологичного вакуумного оборудования и смежных отраслей.

Разработка отечественной конструкции насоса вакуумного спирального (НВСп) должна основываться на глубоком и всестороннем анализе влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на откачные параметры и надежность.

Спиральный насос состоит из подвижной и неподвижной спиралей, причем подвижная спираль совершает орбитальное движение относительно оси неподвижной спирали с некоторым эксцентриситетом. При движении спирали образуется две серии серповидных объемов, которые уменьшают свой объем от периферии спиралей к их центру. Всасывание газа происходит с внешней стороны спиралей, а выхлоп – из отверстия в центре торцевого диска неподвижной спирали.

Основные откачные и энергетические характеристики НВСП, а именно: быстрота действия, предельное остаточное давление, потребляемая мощность, в первую очередь зависят от профиля спирали и ее геометрических параметров (рис. 1): шага, эксцентриситета, радиуса базовой окружности, высоты и толщины пера спирали.

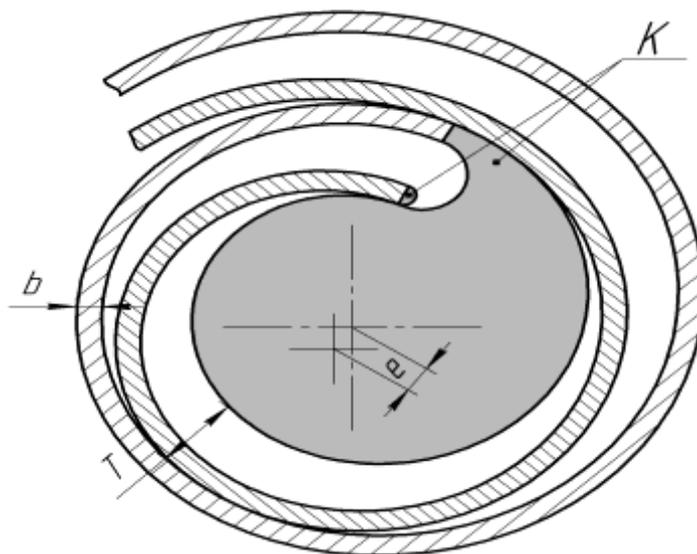


Рис. 1. Геометрия спирали НВСП: K – концевой участок; b – толщина спирали; e – эксцентриситет; T – шаг спирали

Форма, размеры и расположение концевой участка K влияют на продолжительность процесса сжатия, а следовательно и на величину обратных перетеканий, которые, в свою очередь, определяют как откачные, так и энергетические характеристики насоса.

В настоящее время в подавляющем большинстве машин различных производителей используются однозаходные эвольвентные спирали. А вот геометрия концевой участка существенно различается.

Наиболее подробно вопрос построения концевых участков спиралей рассмотрен в работе [4].

Концевые участки спиралей должны отвечать следующим требованиям: непрерывность линии зацепления; максимально возможная «герметичность» рабочей полости, достигаемая за счет минимизации перетеканий между полостями; минимальная величина остаточного объёма при сохранении максимальной геометрической степени сжатия; технологичность, достаточная прочность спирали в зоне окна нагнетания.

Форма и размеры концевой участка зависят от типа подвижного спирального элемента. Для односторонней спирали обычно используется консольное закрепление подвижного спирального элемента (рис. 2). Приводной вал не оказывает здесь влияния на профиль концов спирали. Такая конструкция используется в машинах фирм «Edwards», Busch (Германия) [5], «Varian».

В случае использования двухстороннего спирального элемента вал проходит насквозь через концевой участок (рис. 3), минимальные размеры которого ограничиваются диаметрами вала и подшипникового узла. Здесь применяется двухопорное закрепление подвижного спирального элемента. Такие спирали

используются в НВСП фирм «Anest Iwata», «Geowell» (Китай) [6], «Ulvac» (Япония) [7], «Leybold» (Германия) [8].

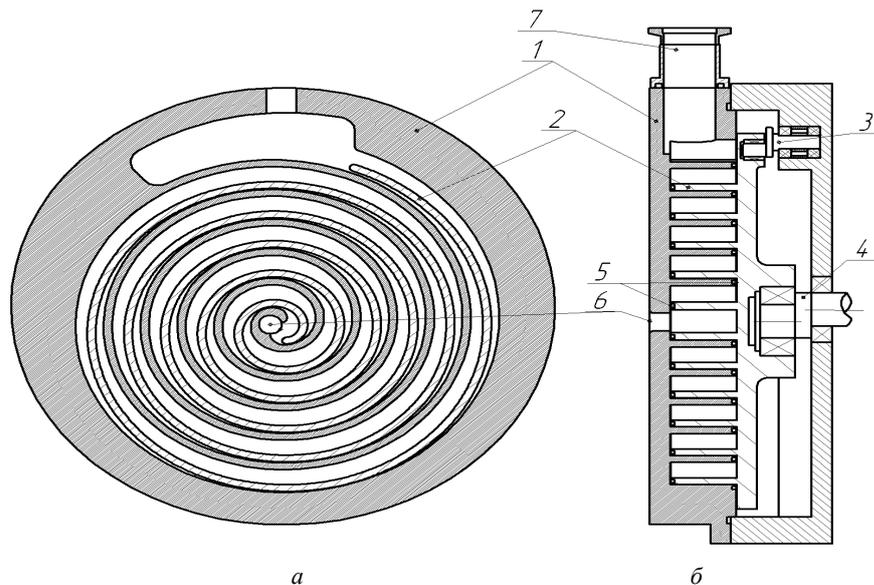


Рис. 2. Односторонний спиральный насос: 1 – неподвижный спиральный элемент; 2 – подвижный спиральный элемент; 3 – противоповоротное устройство; 4 – вал; 5 – уплотнитель; 6 – выхлопное отверстие; 7 – всасывающий патрубок

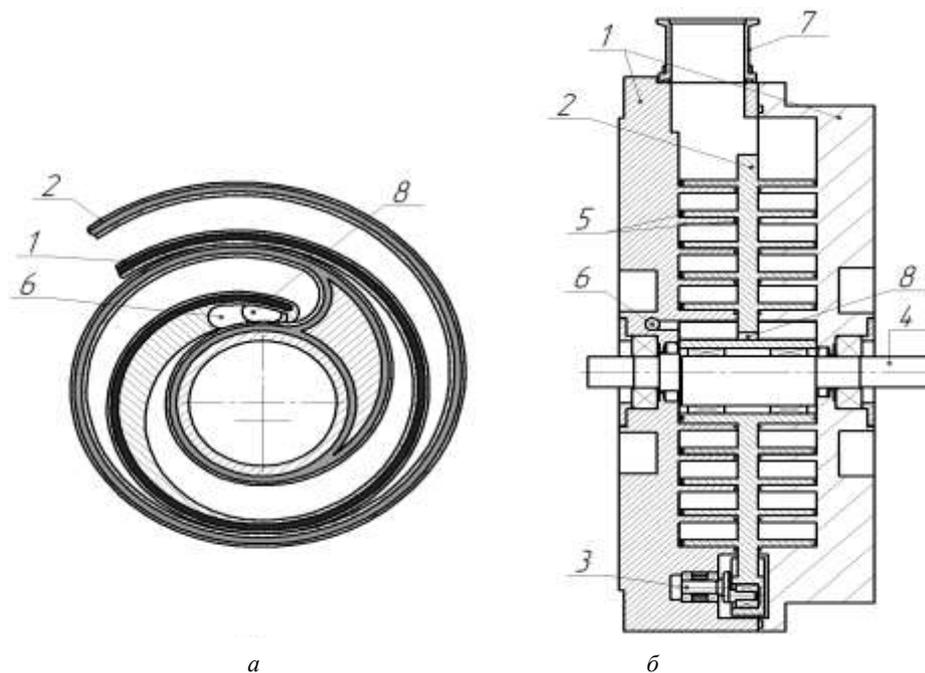


Рис. 3. Двухсторонний спиральный насос: 1 – неподвижный спиральный элемент; 2 – подвижный спиральный элемент; 3 – противоповоротное устройство; 4 – вал; 5 – уплотнитель; 6 – выхлопное отверстие; 7 – всасывающий патрубок; 8 – перепускное отверстие

При постоянном эксцентриситете, толщине и числе витков спирали размеры и форма концевой участка оказывают влияние на характеристики через продолжительность процесса сжатия и радиус кривизны. Максимально возможная продолжительность сжатия на один оборот меньше числа витков спирали, отсчитываемых от центра.

При увеличении размеров концевой участка и сохранении габаритов насоса продолжительность сжатия будет уменьшаться. Она влияет на количество одновременно существующих полостей (чем больше полостей, тем больше сопротивление обратным перетеканиям газа) и геометрическую степень сжатия. Радиус кривизны концевой участка влияет на проводимость канала: чем больше радиус кривизны, тем меньше проводимость канала.

Проведем анализ влияния продолжительности сжатия на энергетические характеристики НВСП. Расчеты проводились с помощью математической модели рабочего процесса НВСП, рассмотренной в работах [9, 10].

Основные геометрические размеры спирали НВСП, на примере которой проводился анализ, представлены в табл. 1.

Таблица

Базовые параметры геометрии спирали НВСП

Название параметра	Значение
Толщина стенки спирали b , мм	3,2
Высота стенки спирали h , мм	34
Радиус базовой окружности r_b , мм	1,767
Частота вращения ротора, об/с	24
Радиальный зазор, мм	0,09
Торцевой зазор, мм	0
Количество витков спирали g	4,78; 5,28; 5,78; 6,28
Продолжительность сжатия $\phi_{СЖ}$, рад	от 0 до 26,35

Рассчитаны индикаторные диаграммы НВСП при различных давлениях на входе в насос. Расчет работы на всасывание, сжатие и нагнетание в полости проводился по формуле

$$L = \int_0^{\phi_{рП}} P dV, \quad (1)$$

где $\phi_{рП} = \phi_{СЖ} + 2\pi$ – продолжительность рабочего процесса; P – давление в рабочей полости как функция от угла поворота, полученная в результате решения системы дифференциальных уравнений [9, 10]; V – объем рабочей полости.

Поскольку в НВСП процесс откачки происходит одновременно в двух полостях, мощность находится:

$$W = (L_1 + L_2) n, \quad (2)$$

где L_1 и L_2 – индикаторная работа для каждой отсеченной полости НВСП; n – частота вращения ротора.

На рис. 4, а при высоких давлениях на входе хорошо видно пережатие газа. При увеличении продолжительности сжатия увеличивается и пережатие, что ведет к росту индикаторной мощности.

При низких давлениях на рис. 4, б, напротив, наблюдается недожатие, что выражается в резком росте давления в рабочих камерах при уменьшении объема. С увеличением продолжительности сжатия площадь индикаторной диаграммы уменьшается, и индикаторная мощность падает.

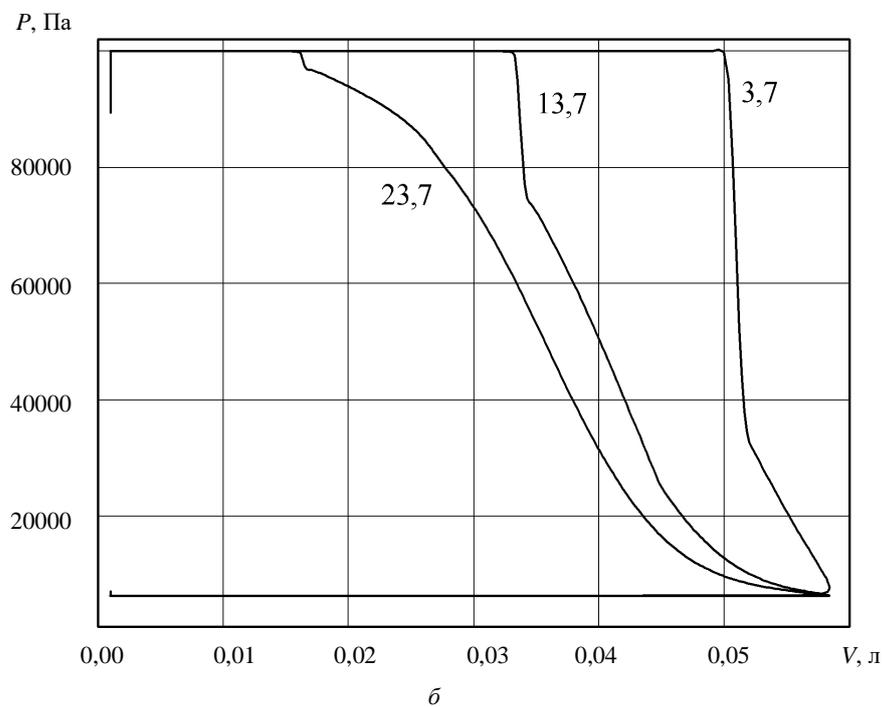
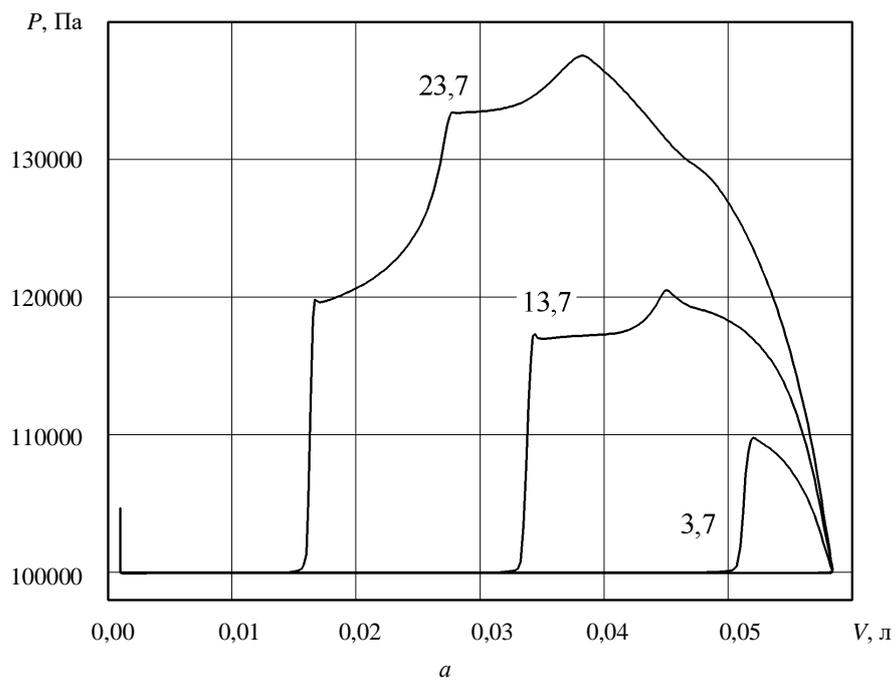


Рис. 4. Индикаторные диаграммы НВСп ($g=5,28$ витка) при различной продолжительности сжатия и давлении на входе: a – 100 кПа; b – 6,3 кПа

На рис. 5, 6 показаны зависимости мощности от давления на входе в НВСп при различном числе витков спирали и продолжительности сжатия. С увеличением продолжительности сжатия происходит рост мощности при давлениях ниже 70 кПа.

При больших давлениях конструкции с меньшей продолжительностью сжатия имеют незначительно меньшую индикаторную мощность.

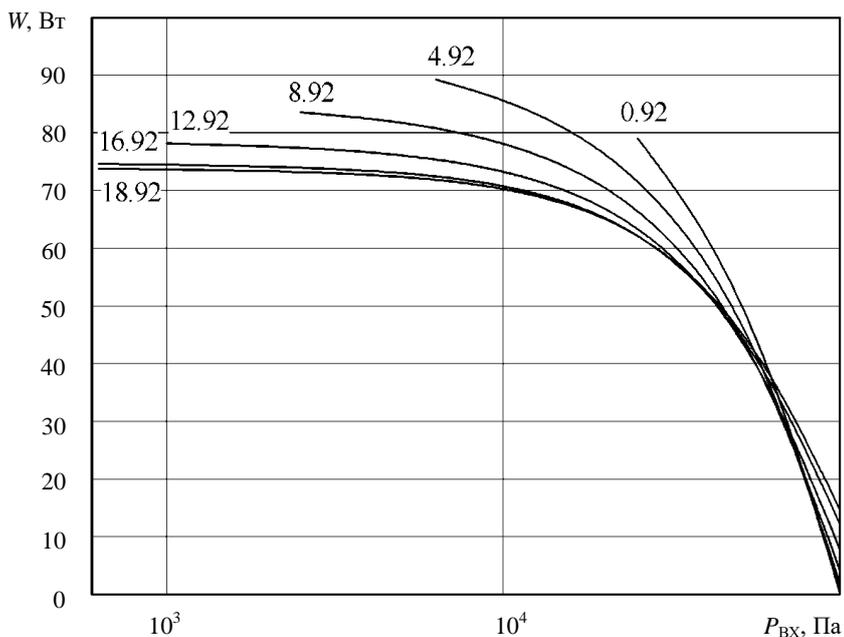


Рис. 5. Зависимость мощности НВСП ($g=4,78$ витка) от давления на входе в насос при различной продолжительности сжатия

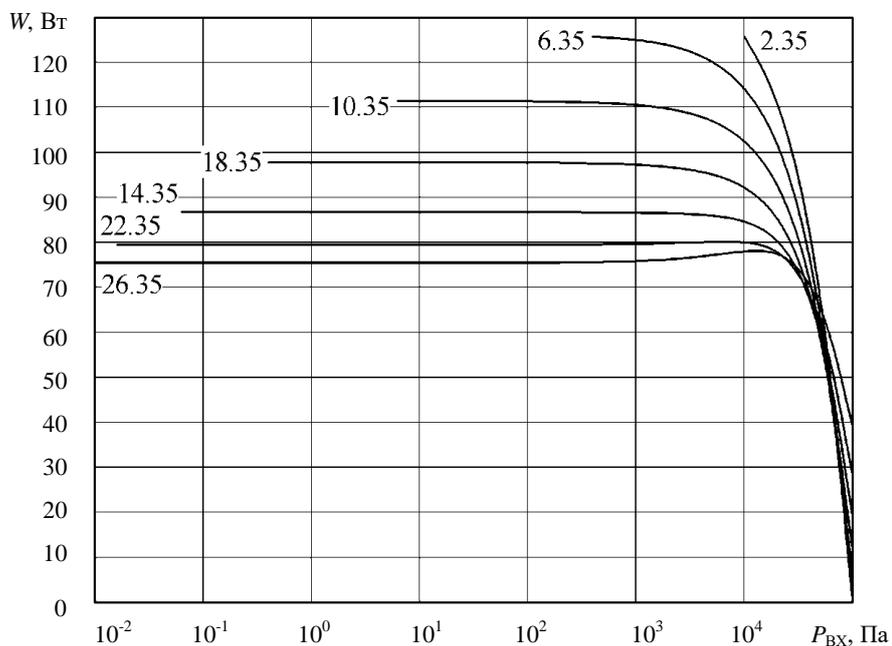


Рис. 6. Зависимость мощности НВСП ($g=6,28$ витка) от давления на входе в насос при различной продолжительности сжатия

Графики на рис. 7 показывают для всех рассмотренных вариантов НВСП незначительное отличие. При высоких давлениях основное влияние на индикаторную

мощность оказывает пережатие газа. Однако при снижении входного давления от атмосферы мощность сжатия растет, достигая максимума в области 10–15 кПа. Это связано с тем, что, наряду с влиянием пережатия, растет доля индикаторной мощности, необходимой для сжатия газа до атмосферного давления.

При дальнейшем снижении давления от 1 кПа количество сжимаемого газа уменьшается, пережатие исчезает, и индикаторная мощность принимает постоянное значение, почти не зависящее от числа витков спирали.

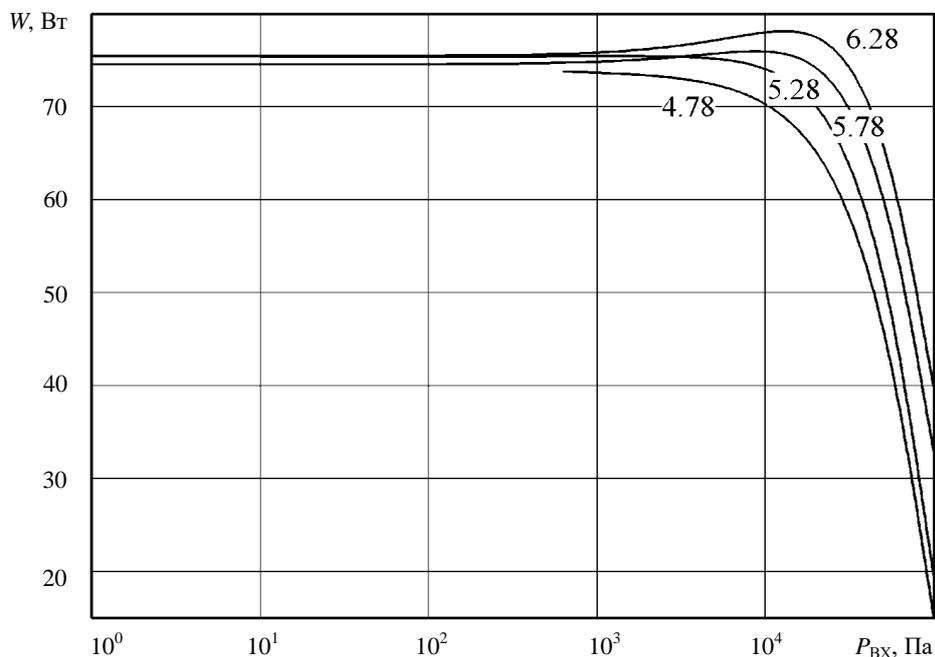


Рис. 7. Зависимость мощности от давления на входе при различном числе витков

На основе проведенных расчетов по влиянию конечного участка и количества витков на процесс откачки можно сделать следующие выводы:

- увеличение продолжительности сжатия не приводит к значительному увеличению индикаторной мощности в области высоких давлений и в то же время снижает мощность в области низких давлений;

- при сохранении продолжительности сжатия изменение геометрии конечного участка спиралей не приводит к ощутимому изменению энергетических характеристик;

- увеличение числа витков спирали не ведет к значительному росту индикаторной мощности. Однако увеличение продолжительности сжатия за счет уменьшения угла начала конечного участка (при постоянном числе витков) приводит к ощутимому снижению потребляемой мощности.

Статья подготовлена в ФГБОУ ВПО «КНИТУ» при финансовой поддержке проекта «Создание высокотехнологичного производства безмасляных спиральных вакуумных насосов для индустрии наносистем и наноматериалов» открытого публичного конкурса по отбору организаций на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства согласно постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года N 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших»

учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Summary

Analysis of influence of scroll vacuum pump end section parameters on its power characteristics is carried out with the help of mathematical model. Dependence of indicated power on vacuum inlet pressure is obtained for a different number of scroll wraps and compression time. It is shown that the increase of compression time does not result in considerable increase of indicated power in high pressures range but results in power decrease in low pressures range.

Key words: scroll pump, oil-free pump, end section, gas compression, indicated power, pumping characteristics, compression time.

Литература

1. Dry Scroll Vacuum Pumps [Электронный ресурс] / AnestIwata. USA.: Anest Iwata, 2013. Режим доступа: <http://anestiwata.com/product-category/vacuum-pumps/>, свободный.
2. Edwardsn XDS - the great new shape of dry vacuum pumping [Электронный ресурс] /Edwards Ltd.- United Kingdom.: Edwards Ltd,2013. Режим доступа: http://www.edwardsvacuum.com/nxds/en/index.html?cmpid=HomepageLink_nXDS0412, свободный.
3. Primary / Medium Vacuum Pumps [Электронный ресурс] / Agilent USA, 2014. Режим доступа: <http://www.chem.agilent.com/en-US/products-services/Instruments-Systems/Vacuum-Technologies/Primary-Vacuum-Pumps/Pages/default.aspx>, свободный.
4. Lee, Y., & Wu, W., 1995. On the profile design of a scroll compressor, Int. J. Refrig., Vol. 18, No. 15, pp. 308-317.
5. Busch Info. Fossa - Scroll vacuum pump [Электронный ресурс] / Busch USA, 2014. Режим доступа: <http://www.buschusa.com/products/product-portfolio/fossa> свободный.
6. GWSP Oilfree Scroll Vacuum Pump [Электронный ресурс] / Geowell China, 2014. Режим доступа: <http://www.geowell.com.cn/en/product.asp?id=9>, свободный.
7. Small Dry Pumps [Электронный ресурс] / ULVAC Technologies USA, 2014. Режим доступа: <http://www.ulvac.com/vacuum-pumps-components/component.cfm?cid=42&scid=100>, свободный.
8. SCROLLVAC Scroll Vacuum Pumps [Электронный ресурс] / Oerlikon Leybold Vacuum GmbH Germany, 2014.– Режим доступа: https://leyboldproducts.oerlikon.com/products/produktkatalog_03.aspx?cid=20_30_0, свободный.
9. Райков А.А. Всережимная математическая модель рабочего процесса спирального вакуумного насоса / А.А. Райков, Р.Р. Якупов, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, М.Д. Бронштейн // Компрессорная техника и пневматика. 2014. № 1. С.18-25.
10. Саликеев С.И. Единый подход к расчету откачных характеристик бесконтактных безмасляных вакуумных насосов / С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, А.А. Райков // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 4. С.37-42.

Поступила в редакцию

23 января 2015 г.

Райков Алексей Александрович – канд. техн. наук, ассистент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок» Казанского национального исследовательского технологического университета. Тел: 8(843)231-42-70. E-mail: ors@hitv.ru.

Бурмистров Алексей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок» Казанского национального исследовательского технологического университета. Тел: 8(843)231-42-70. E-mail: burm@kstu.ru.

Саликеев Сергей Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок» Казанского национального исследовательского технологического университета. E-mail: 8(843)231-42-70. E-mail: salikeev_s@mail.ru.

Капустин Евгений Николаевич – канд. техн. наук, генеральный директор ОАО «Вакууммаш». Тел: 8(843)278-35-27. E-mail: kazan@vacma.ru.