

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЖИДКОСТНОКОЛЬЦЕВОГО ВАКУУМ-НАСОСА МОДУЛЬНОГО ТИПА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ СТУПЕНЕЙ

**Ю.В. Родионов¹, Д.В. Никитин¹, В.А. Преображенский¹,
А.С. Зорин¹, А.А. Баранов²**

*Кафедры: «Теория механизмов машин и детали машин» (1),
«Техника и технологии производства нанопродуктов» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;
rodionov.u.w@rambler.ru*

Представлена членом редколлегии профессором Ю.В. Воробьевым

Ключевые слова и фразы: быстрота действия; вакуумирование; давление включения; эффективная мощность.

Аннотация: Рассмотрен процесс вакуумирования двухступенчатым жидкостнокольцевым вакуум-насосом модульного типа с последовательным включением ступеней. На основании экспериментальных и теоретических исследований предложена методика расчета основных геометрических и кинематических соотношений ступеней двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуум-насоса с последовательным включением ступеней.

Обозначения

b – ширина корпуса вакуум-насоса, м;	$V_{р.п.вс}$ – рабочий объем всасывающей полости, м ³ ;
Eu_m – модифицированное число Эйлера;	$V_{р.п.н}$ – рабочий объем нагнетательной полости, м ³ ;
e – эксцентриситет, м;	ε – относительный эксцентриситет;
n – показатель политропы;	η_2 – потери действительной быстроты действия вследствие обратных токов парогазовой смеси;
p – давление всасывания, Па;	τ – степень повышения давления;
p_n – давление нагнетания, Па;	φ – угол поворота лопаток рабочего колеса, рад;
$p_{пред}$ – предельное давление, достигаемое вакуум-насосом, Па;	χ – относительная ширина колеса;
$p_{сж}$ – давление сжатия, Па;	ω – угловая скорость вращения, рад/с.
S – действительная быстрота действия, м ³ /ч;	
V – объем ступени, м ³ ;	

Широкое применение двухступенчатых жидкостнокольцевых вакуум-насосов (**ЖВН**) в вакуумных системах обуславливается их надежностью, отсутствием маслонасосов и специальных систем смазки. Наиболее технологична конструкция ЖВН в модульном исполнении, то есть размеры рабочих колес и корпусов одинаковы, что существенно снижает затраты на проектирование и изготовление вакуумных насосов.

Основными недостатками двухступенчатых ЖВН являются повышенные затраты мощности, потери быстроты действия на начальных и предельных режимах вакуумирования. Существует ряд работ, посвященных устранению данных недостатков [1–3], однако, существенно снизить удельные энергозатраты пока не удается.

Как известно, эффективная мощность двухступенчатого ЖВН модульного типа определяется по формуле [2]

$$N_{\text{э}} = N_{\text{сж1}} + N_{\text{сж2}} + N_{\text{г1}} + N_{\text{г2}} + N_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{сж1}}$, $N_{\text{сж2}}$ – мощность, затрачиваемая на сжатие парогазовой смеси в первой и второй ступенях соответственно, кВт; $N_{\text{г1}}$, $N_{\text{г2}}$ – мощность, затрачиваемая на перемещение жидкостного кольца в первой и второй ступенях соответственно, кВт; $N_{\text{тр}}$ – мощность, затрачиваемой на преодоление трения в сальниках и подшипниках, кВт.

На начальных режимах вакуумирования для сжатия и нагнетания парогазовой смеси достаточно энергии «жидких поршней» одной ступени, а вторая ступень, работая вхолостую, повторяет фазы всасывания и нагнетания, что приводит к потерям парогазовой смеси, уменьшению быстроты действия ЖВН и дополнительным энергозатратам.

$$S = S_1 \lambda_2, \quad (2)$$

где $\lambda_2 = 1 - \eta_2$.

Организация процесса вакуумирования с последовательным включением ступеней позволит исключить на начальных стадиях работы затраты мощности на сжатие парогазовой смеси во второй ступени $N_{\text{сж2}}$ и $N_{\text{г2}}$, затрачиваемой на перемещение жидкостного кольца во второй ступени [4].

Эффективная мощность двухступенчатого ЖВН модульного типа с последовательным включением ступеней в зависимости от режима вакуумирования определяется по формулам:

$$\begin{cases} N_{\text{э}} = N_{\text{сж1}} + N_{\text{г1}} + N_{\text{тр}} & \text{при } p_{\text{н}} \leq p \leq p_1^*; \\ N_{\text{э}} = N_{\text{сж1}} + N_{\text{сж2}} + N_{\text{г1}} + N_{\text{г2}} + N_{\text{тр}} & \text{при } p > p_1^*. \end{cases} \quad (3)$$

Основным условием при проектировании двухступенчатых ЖВН модульного типа является правильный подбор степени повышения давления в ступенях, а в конструкции с последовательным включением ступеней – определение давления включения второй ступени.

Давление, при котором должна включаться вторая ступень, определяется степенью повышения давления в первой ступени τ_1 ,

$$\tau_1 = \frac{p_{\text{н1}}}{p}. \quad (4)$$

Причем включение второй ступени в конструкции с последовательной работой ступеней должно происходить, когда давление в последней ячейке сжатия (давления внутреннего сжатия) больше давления в выпускном патрубке

$$p_{\text{сж}} \geq p_{\text{н}} = p_{\text{атм}}. \quad (5)$$

При условии (5) нет обратных токов парогазовой смеси и для определения давления нагнетания в первой ступени воспользуемся формулой [5]

$$p_{\text{н1}} = p_{\text{сж1}} = p \tau_1^n - \Delta p_{\text{ут}}, \quad (6)$$

где $\Delta p_{\text{ут}}$ – потери давления вследствие утечки газовой фазы.

Экспериментально установлено для значений торцевого зазора между рабочим колесом и крышками в пределах от 0,003 до 0,005 м, относительного эксцентриситета $\varepsilon = 0,15$ и наименьшего зазора между рабочим колесом и корпусом $\Delta = 0,0125$ м, потери давления определяются

$$\Delta p_{\text{ут}} = 0,2 \tau^n p_1. \quad (7)$$

Значение давления включения второй ступени можно определить как

$$p_1^* = \frac{101,3}{\tau_1^n 0,8}. \quad (8)$$

От начала вакуумирования до значения $p = p_1^*$ двухступенчатый ЖВН с последовательным включением ступеней работает как одноступенчатый («классическое исполнение» – неподвижный корпус, вращающееся рабочее колесо, торцевая подача газа) [6]. При значении $p \geq p_1^*$ включается в работу вторая ступень.

При проектировании ЖВН рассчитывается на максимально устойчивое остаточное давление, но также необходимо учитывать выбор величины повышения давления первой ступени.

На основании экспериментальных исследований, проведенных ранее [1, 2], и с учетом, что давление нагнетания в первой ступени в момент включения равно атмосферному давлению, степень повышения в первой ступени определяется из формул:

$$\begin{cases} \tau_1 = 0,2\tau_{уст} \text{ при } \tau_{уст} = 10 \dots 15; \\ \tau_1 = 0,075\tau_{уст} \text{ при } \tau_{уст} = 10 \dots 50. \end{cases} \quad (9)$$

При проектировании ЖВН для получения минимальных массогабаритов необходимо, чтобы рабочие объемы первой и второй ступеней находились в соотношении

$$V_2 = \frac{V_1}{\tau_1}. \quad (10)$$

Конструктивно для насоса модульного типа это соотношение достигается отношением ширины $b_2 = \frac{b_1}{\tau_1}$.

Для эффективной работы ЖВН в интервале работы от p_1^* до $p_{пред}$, когда работают обе ступени, необходимо соблюдение двух условий:

- жидкостные кольца ступеней должны быть идентичны;
- быстрота действия второй ступени определяется из соотношения

$$S_2' = \frac{S_1}{\lambda_2 \tau_1}. \quad (11)$$

Эта задача точно решается методом последовательных приближений или оптимизации по критерию $N_{уд} = \frac{N_3}{S} \rightarrow \min$.

Для оптимальной работы двухступенчатого ЖВН необходимо, чтобы конструктивные и кинематические параметры второй ступени удовлетворяли условиям:

$$\frac{b_1}{\tau_1} \leq b_2 \leq b_1 \quad \text{и} \quad \omega_1 \leq \omega_2 \leq \omega_{кр}.$$

где $\omega_{кр}$ – критическая угловая скорость, рад/с.

Двухступенчатый ЖВН модульного типа имеет одинаковые размеры ступеней в торцевом сечении, равные размеры диаметров корпусов и диаметров рабочих колес (в ЖВН с последовательным включением равно количество лопаток рабочего колеса в каждой ступени). Предположив, что рабочие полости ступеней идентичны и объем нагнетательной полости первой ступени равен объему всасывающей полости второй ступени, получаем

$$V_{р.п.н1} = F_{р.п.н1} b_1 = V_{р.п.вс2}. \quad (12)$$

Объем рабочей полости первой ступени определяется, как

$$V_{р.п.п1} = \frac{F_{р.п.вс1} b_1}{\tau_1}. \quad (13)$$

Конструктивно у двухступенчатого насоса модульного типа площади всасывающих окон ступеней одинаковы. Тогда

$$\frac{F_{р.п.вс1} b_1}{\tau_1} = F_{р.п.вс1} b_2, \quad (14)$$

отсюда получаем

$$\frac{b_2}{b_1} = \frac{1}{\tau_1} \quad \text{или} \quad b_2 = \frac{b_1}{\tau_1}. \quad (15)$$

Установлено, что жидкостные кольца в первой и второй ступенях идентичны при условии

$$Eu_{m1} = Eu_{m2}. \quad (16)$$

Так для двухступенчатого ЖВН модульного типа с последовательным включением ступеней, быстротой действия 30 м³/ч, предельно достигаемым вакуумом 5 кПа и конструктивными параметрами:

$$\chi_1 = \frac{b_1}{r_2} = 2; \quad \chi_2 = \frac{\chi_1}{\tau_1} = 0,8; \quad \varepsilon = \frac{e}{r_2} = 0,15; \quad \tau_1 = 2,5; \quad \omega_1 = 298,3 \text{ рад/с},$$

установлена эмпирическая зависимость между числами подобия в первой и второй ступенях при условии соблюдения идентичности жидкостных колец (рис. 1).

Из условия (16) получаем соотношения угловых скоростей вращения рабочих колес ступеней для конкретных режимов

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = k. \quad (17) \quad Eu_m$$

Дополнительным условием является ограничение предельной скорости второй ступени из условия разбрызгивания и кавитационного порога. Так же необходимо, чтобы угловая скорость вращения рабочего колеса в зоне нагнетания первой ступени была равна угловой скорости вращения рабочего колеса в зоне всасывания второй ступени.

Всасывающее окно располагается в серповидной части воздушного пространства всасывающей полости (рис. 2). При проектировании ЖВН нижнюю часть всасывающего окна необходимо располагать так, чтобы нижняя кромка не доходила до вертикальной оси на половину ячейки рабочего колеса. Верхнюю часть всасывающего окна располагаем под углом 45...50° от вертикальной оси корпуса.

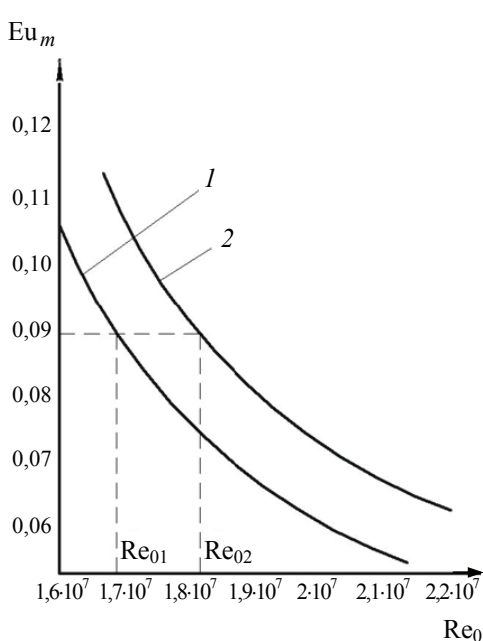


Рис. 1. Зависимость между критериями подобия:
1 – первой ступени; 2 – второй ступени

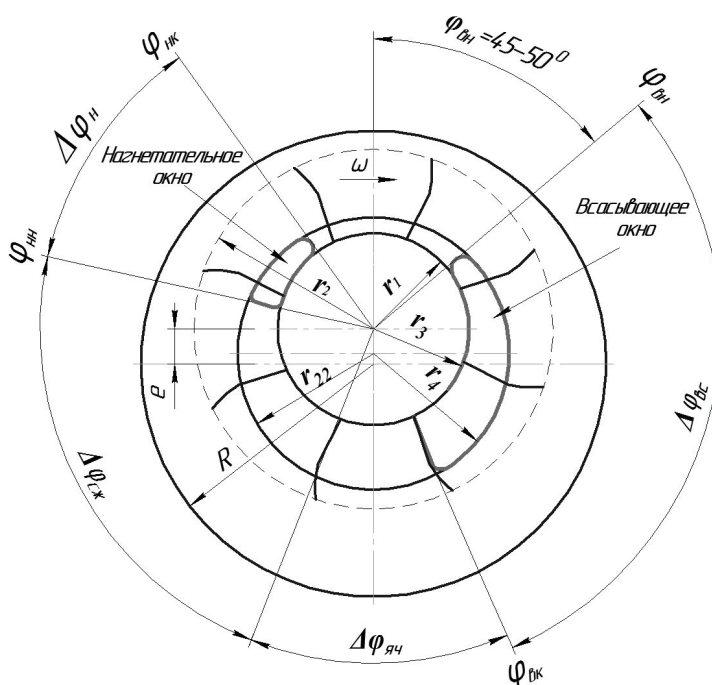


Рис. 2. Принципиальная схема расположения всасывающего и нагнетательного окон в ступени ЖВН

Для устойчивой работы ЖВН на предельных режимах вакуумирования при проектировании всасывающего окна необходимо обеспечить равенство наружного радиуса всасывающего окна r_4 радиусу внутренней поверхности жидкостного кольца r_{22} . При этом внутренний радиус всасывающего окна r_3 должен быть равен радиусу втулки рабочего колеса r_1 (см. рис. 2).

Соответственно в зависимости от площади всасывающего окна второй ступени определяется и площадь нагнетательного окна $F_{н2} = \frac{F_{вс2}}{\tau_2}$. С одной стороны, размеры нагнетательного окна ограничиваются втулкой рабочего колеса, с другой стороны, – внутренней поверхностью жидкостного кольца, рассчитанного для предельного остаточного давления.

Так как известны угловая скорость первой ступени и угловая координата нагнетательной полости, получим $\omega_1 = \frac{d\varphi_{н1}}{dt}$. Откуда

$$t = \int_{\varphi_{нн1}}^{\varphi_{нк1}} \frac{d\varphi_{н}}{\omega_1}. \quad (18)$$

Тогда $t = \frac{1}{\omega_1} (\varphi_{нк1} - \varphi_{нн1})$.

Угловая скорость вращения второй ступени через угол поворота всасывающей полости определим по формуле

$$\omega_2 = \frac{d\varphi_{вс2}}{dt},$$

откуда

$$\omega_2 = \frac{\Phi_{\text{вс2к}} - \Phi_{\text{вс2н}}}{t}. \quad (19)$$

Из отношения угловых скоростей ступеней по критерию совмещения получаем $\frac{\omega_2}{\omega_{к1}} = k^*$ и $k^* \leq k$. Если это условие не соблюдается, необходимо изменять геометрические параметры всасывающего и нагнетательного окон ступеней.

При проектировании остальные геометрические параметры второй ступени считаются аналогично, как и в первой.

Проведенные экспериментальные исследования позволили подтвердить полученные теоретически формулы, характеризующие особенности методики проектирования двухступенчатого ЖВН с последовательным включением ступеней. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

Разработанная методика расчета позволяет спроектировать двухступенчатый ЖВН с последовательным включением ступеней, характеризующийся минимальными удельными энергетическими затратами, высокими эксплуатационно-техническими показателями, универсальностью использования с точки зрения достигаемой глубины вакуума.

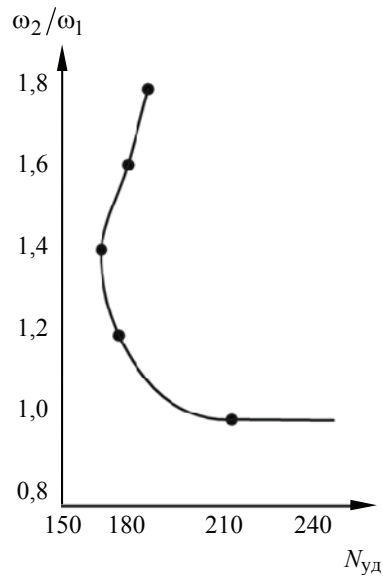


Рис. 3. Зависимость удельной мощности двухступенчатого ЖВН с последовательным включением ступеней от отношения частот вращения ступеней

Список литературы

1. Автономова, И.В. Определение промежуточного давления в двухступенчатых жидкостно-кольцевых вакуум-насосах / И.В. Автономова // Изв. вузов. Машиностроение. – 1983. – № 3. – С. 87–90.
2. Родионов, Ю.В. К вопросу оптимизации конструктивных параметров двухступенчатых жидкостно-кольцевых вакуумных насосов / Ю.В. Родионов, Ю.В. Воробьев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2000. – Т. 6, № 2. – С. 274–280.
3. Воробьев, Ю.В. Оптимизация конструктивных параметров жидкостно-кольцевых вакуум-насосов / Ю.В. Воробьев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 397–403.
4. Пат. 2343316 Российская Федерация, МПК F 04 C 7/00, F 04 C 19/00. Двухступенчатая жидкостно-кольцевая машина / Воробьев Ю.В., Максимов В.А., Попов В.В., Родионов Ю.В., Свиридов М.М. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2343316 ; заявл. 20.04.2007 ; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1. – 5 с.
5. Попов, В.В. Основы проектирования жидкостнокольцевых вакуум-насосов с автоматическим регулированием нагнетательного окна / В.В. Попов, Ю.В. Родионов, М.М. Свиридов // Современные проблемы технологии производства, хранения, переработки и экспертизы качества сельскохозяйственной продукции : материалы междунар. науч.-практ. конф., 26–28 февр. 2007 г. / Мичур. гос. аграр. ун-т. – Мичуринск, 2007. – Т. 2. – С. 285–291.
6. Никитин, Д.В. Совершенствование конструкций и обеспечение заданных эксплуатационных характеристик жидкостнокольцевых вакуум-насосов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 : защищена : 31.10.10 : утв. 11.03.11 / Никитин Дмитрий Вячеславович. – Тамбов, 2010. – 158 с.

Features of Calculating Two-Phase Liquid Ring-Shaped Vacuum Pump of Modular Type with Serial Activation of Phases

Yu.V. Rodionov¹, D.V. Nikitin¹, V.A. Preobrazhensky¹, A.S. Zorin¹, A.A. Baranov²

*Departments: "Theory of Machine Mechanisms and Machine Parts" (1),
"Equipment and Technology of Nanoproducts Manufacturing" (2), TSTU;
rodionov.u.w@rambler.ru*

Key words and phrases: action velocity; activation pressure; effective capacity; vacuuming.

Abstract: The paper studies the process of vacuuming with two-phase liquid ring-shaped vacuum pump of modular type with serial activation of phases. On the basis of empirical and theoretical studies we propose a method for calculating the basic geometric and kinematic relations of phases of the examined vacuum pump.

Besonderheiten der Berechnung der zweigestufigen Flüssigkeitsringvakuumpumpe des Modultypus mit der konsequenten Stufeneinschaltung

Zusammenfassung: Es ist den Prozess der Vakuumbehandlung von der zweigestufigen Flüssigkeitsringvakuumpumpe des Modultypus mit der konsequenten Stufeneinschaltung betrachtet. Aufgrund der experimentalen und theoretischen Forschungen ist die Methodik der Berechnung der geometrischen und kinematischen Hauptverhältnisse der Stufen der zweigestufigen Flüssigkeitsringvakuumpumpe des Modultypus mit der konsequenten Stufeneinschaltung vorgeschlagen.

Particularités du calcul de la pompe circulaire liquide à deux étages du type modulaire avec un embrayage successif des étages

Résumé: Est examiné le processus de la mise sous vide par une pompe circulaire liquide à deux étages du type modulaire avec un embrayage successif des étages. A la base des études expérimentales et théoriques est proposée la méthode du calcul des relations essentielles géométriques et cinétiques des étages de la pompe circulaire liquide à deux étages du type modulaire avec un embrayage successif des étages.

Авторы: *Родионов Юрий Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов машин и детали машин»; *Никитин Дмитрий Вячеславович* – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Теория механизмов машин и детали машин»; *Преображенский Владимир Александрович* – аспирант кафедры «Теория механизмов машин и детали машин»; *Зорин Александр Сергеевич* – аспирант кафедры «Теория механизмов машин и детали машин»; *Баранов Андрей Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».