

ЖИДКОСТНОКОЛЬЦЕВЫЕ ВАКУУМ-НАСОСЫ ДЛЯ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Д. В. Никитин¹, Ю. В. Родионов¹, М. А. С. Махмуд¹,
А. И. Скоморохова², А. Н. Пахомов³, А. С. Зорин⁴

*Кафедры: «Механика и инженерная графика» (1), rodionow.u.w@rambler.ru;
«Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (2);
«Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (3),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
ООО «3-лайн» (4), г. Рассказово, Тамбовская обл., Россия*

Ключевые слова: жидкостнокольцевой вакуум-насос; материальный баланс; тепловой баланс; теплообмен.

Аннотация: Рассмотрен расчет жидкостнокольцевого вакуум-насоса на примере процесса сушки различных материалов. Установлено, что для двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки экономически эффективно применять двухступенчатый жидкостнокольцевой вакуум-насос с возможностью отключения второй ступени. Представлена методика расчета удельной мощности одноступенчатого и двухступенчатого жидкостнокольцевых вакуум-насосов с учетом теплопереноса и тепловых процессов, возникающих во время работы.

Введение

Жидкостнокольцевые вакуум-насосы (ЖВН) представляют собой механические машины прямого вытеснения, которые могут работать в режиме как вакуумного компрессора, так и вакуумного насоса. Основной технической характеристикой ЖВН, определяющей область применения, является устойчивый диапазон предельного давления разряжения (вакуума). По данной характеристике ЖВН разделяют на одноступенчатые, двухступенчатые и жидкостно-пластинчатые вакуум-насосы (ЖПВН) [1 – 3], которые имеют ряд важных достоинств, таких как надежность эксплуатации, достаточная простота конструкции и невысокий уровень шума в процессе работы. По сравнению с поршневыми и ротационными вакуумными насосами и компрессорами ЖВН имеют следующие преимущества: сжатие с малым показателем политропы; низкие производственные затраты; способность работать с горючими и взрывоопасными газами [4, 5].

Жидкостнокольцевые вакуум-насосы широко используют в процессах переработки и для транспортирования различных материалов (полимеры, растительное сырье и др.) [6 – 9]. В зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик выбирается конструкция насоса. Показателем эффективности, определяющим работу ЖВН, является температурный режим рабочей жидкости. Это обосновано тем, что при нагнетании происходит процесс интенсивного отвода тепла от газа к рабочей жидкости, сопровождающийся ее нагревом. Поэтому при проектировании насосов необходимо значительное внимание уделять именно

тепловым явлениям, возникающим при работе ЖВН. Окончательный выбор типоразмера насоса осуществляется по величине удельной мощности, зависящей от необходимой для конкретной задачи скорости действия (производительности).

Одним из наиболее важных тепломассообменных процессов, в которых используется ЖВН, является сушка различных материалов.

Цель статьи – разработка методики расчета удельной мощности двухступенчатого ЖВН с возможностью отключения второй ступени при работе как на одной, так и двух ступенях для процессов сушки с учетом влияния тепловых процессов, происходящих в насосе и сушильной установке.

Методика и методы

Для исследования характеристик ЖВН, расчета удельной мощности и давления разрежения при различных тепломассообменных и тепловых процессах пользуемся базовыми литературными источниками [1, 3 – 5, 10 – 14], а также книгами по термодинамике, теплопередаче и механике жидкости. Для изучения особенностей протекания процессов сушки использованы работы [6 – 8, 15 – 19].

Рассмотрим процесс двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки (ДКВИС), которая эффективна для материалов с большим содержанием влаги. Она позволяет проводить процесс при невысоких температурах, ограничивающих денатурацию (разложение) важных химических элементов высушиваемого сырья [15 – 18].

В конструкции ДКВИС с рециркуляцией рабочей жидкости для поддержания нормальной работы насоса первая ступень выполнена в виде сушилки с закрученным слоем, после которой предусматриваются дополнительные емкости для предварительных сухих импульсов, необходимых для раскрытия капилляров материала с целью лучшего извлечения влаги. Их внедрение снижает время сушки второй ступени на 10 – 15 % [19].

Конвективная вакуум-импульсная сушильная установка второй ступени состоит из сушильного шкафа 2, в котором расположены лотки с высушиваемым сырьем, на базе двухступенчатого ЖВН 17, привод которого осуществляется от электродвигателя 18 (рис. 1).

Во время процесса сушки лотки с материалом подвергаются равномерному обдуву. Сушильным агентом выступает атмосферный воздух, нагретый с помощью калорифера 11. Регулируемые вентили 3 – 5, 7, 8, 10, 16, 20 – 24 необходимы для контроля процесса сушки. Термопара 1 позволяет проводить контроль температуры высушиваемого материала. По окончании продувки предусмотрено автоматическое переключение на режим вакуумирования для проведения вакуумной сушки.

Параметры, необходимые для расчета сушильных установок, находят на основе материального и теплового балансов с учетом общего количества энергии, которая необходима для нагрева материала, по методикам, подробно изложенным в работах [19, 20]. После анализа материального и теплового балансов определяется количество испаренной влаги на каждой из ступеней, исходя из которого находится расход воздуха. По величине испаренной влаги определяется производительность сушильной установки.

Секундный тренд иллюстрирует влияние образовавшегося пара на изменение давления в объеме вакуум-импульсной сушилки (рис. 2). После падения температуры и поднятия давления происходит периодическое повторение фаз.

В процессе сушки ЖВН используется при работе обеих ступеней для фазы сушки сельскохозяйственных растительных материалов под вакуумом. На первой ступени обеспечивается нагрев до температуры выше температуры кипения под вакуумом, но ниже температуры, приводящей к потере важных химических элементов материала. Выбор конструкции и типоразмера ЖВН определяется составом сырья и скоростью действия насоса по сухому материалу.

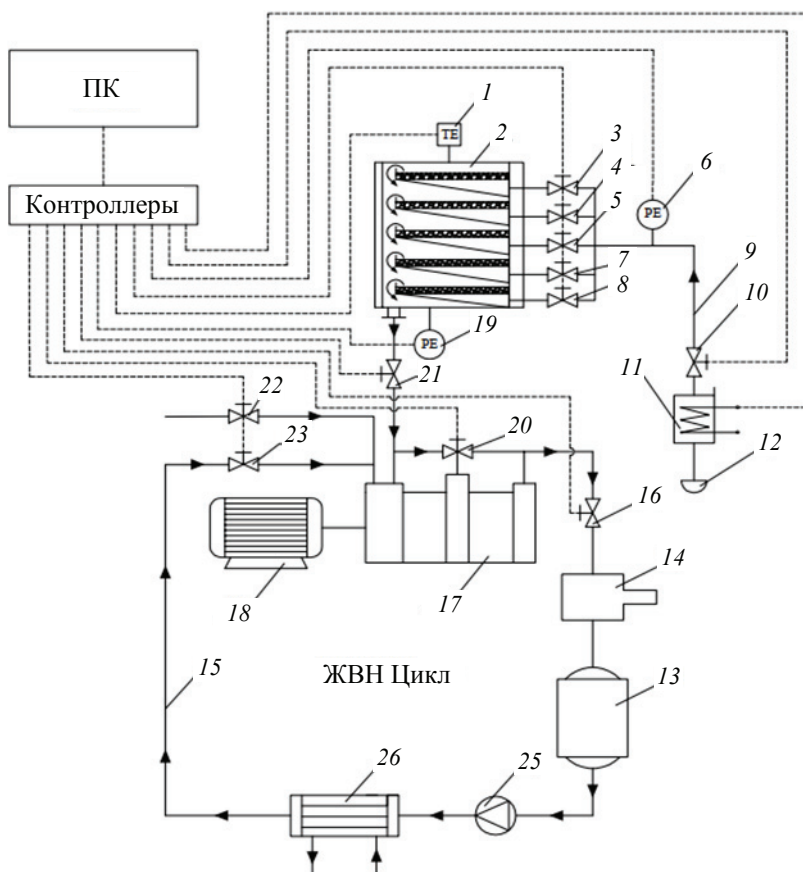


Рис. 1. Конвективная вакуум-импульсная сушильная установка второй ступени:
 1 – термопара; 2 – сушильный шкаф; 3 – 5, 7, 8, 10, 16, 20 – 24 – вентили; 6, 19 – вакуумметры; 9, 15 – трубопроводы; 11 – калорифер; 12 – воздуходувка; 13 – емкость; 14 – разделитель газовой и жидкой фаз; 17 – двухступенчатый ЖВН с возможностью отключения второй ступени; 18 – электродвигатель; 25 – водяной насос; 26 – теплообменник для охлаждения рабочей жидкости

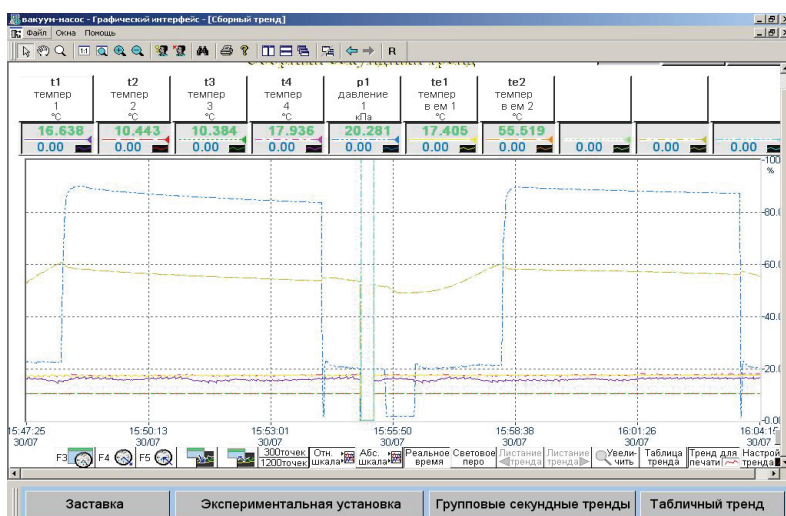


Рис. 2. Интерфейс программы «КРУГ-2000»

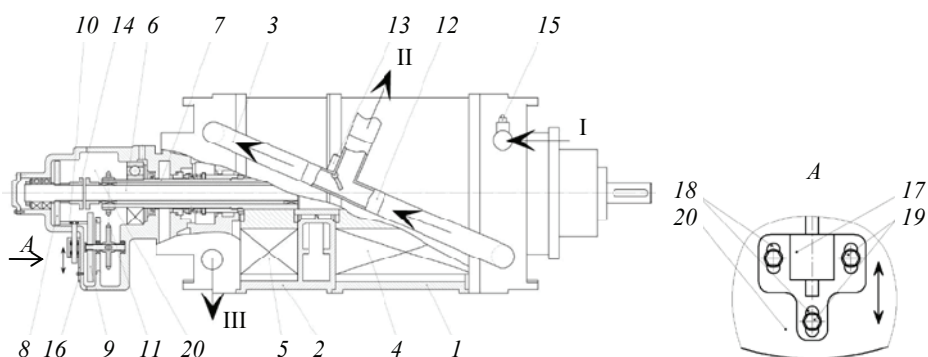


Рис. 3. Схема двухступенчатого жидсточнокольцевого вакуум-насоса с возможностью отключения второй ступени:

1, 2 – корпуса первой и второй ступеней соответственно; 3 – патрубок; 4, 5 – рабочие колеса первой и второй ступеней соответственно; 6 – вал первой ступени; 7 – полый вал второй ступени; 8, 9 – диски; 10 – промежуточный ролик; 11 – цепная передача; 12 – тройник; 13, 14 – электромагнитные заслонка и муфта соответственно; 15 – датчик; 16 – механизм регулировки; 17 – корпус подшипников; 18 – пазы; 19 – винты; 20 – корпус передачи; I–II и II–III – движение газовой фазы при работе на одной и двух ступенях соответственно

Исходя из экспериментальных наблюдений, для высушивания материала под вакуумом требуется двухступенчатый ЖВН, в то время как для продувки достаточно применять одноступенчатую конструкцию. Это обуславливает целесообразность с экономической точки зрения применения двухступенчатого ЖВН с возможностью отключения второй ступени [10, 21, 22] на режиме продувки (рис. 3).

Результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, основным критерием температуры нагрева материала является сохранение необходимых элементов, важных для использования высушиваемого материала по назначению. На основе данного требования разрабатывается последовательность и режимные параметры процесса. Выдержка высушиваемого материала под вакуумом интенсифицирует сушку за счет кипения при щадящих температурах. Зависимость температуры кипения от давления разряжения определяется по таблице или графику [11].

Удельную мощность на валу ЖВН представим в виде

$$N_{уд} = \frac{N_e}{S_d}, \quad (1)$$

где N_e – полная эффективная мощность ЖВН, кВт; S_d – действительная быстрота действия, м³/с.

При работе только на первой ступени эффективная мощность равна

$$N_e = N_{e1}, \quad (2)$$

где N_{e1} – эффективная мощность первой ступени, кВт.

Полная эффективная мощность двухступенчатого ЖВН

$$N_e = N_{e1} + N_{e2}, \quad (3)$$

где N_{e2} – эффективная мощность второй ступени, кВт.

В свою очередь величина эффективной мощности определяется при работе в двух режимах ЖВН:

– одноступенчатого

$$N_{e1} = N_{сж1} + N_{Г1} + N_{ТР}, \quad (4)$$

где $N_{сж1}$ – мощность, которая требуется для сжатия парогазовой смеси в первой ступени, кВт; $N_{Г1}$ – мощность, необходимая для перемещения жидкостного кольца первой ступени, кВт; $N_{ТР}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление трения в сальниках и подшипниках, кВт;

– двухступенчатого

$$\left. \begin{aligned} N_{e1} &= N_{сж1} + N_{Г1} + N_{ТР} \\ N_{e2} &= N_{сж2} + N_{Г2} + N_{ТР} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где $N_{сж2}$ – мощность, которая требуется для сжатия парогазовой смеси во второй ступени, кВт; $N_{Г2}$ – мощность, требуемая для перемещения жидкостного кольца второй ступени, кВт.

Мощность сжатия $N_{сж}$ ЖВН определяется:

– для одноступенчатого

$$N_{сж1} = p_1 S_1 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{m_{ср} - 1}{\tau_1^{m_{ср}} - 1} \right], \quad (6)$$

где p_1 – давление всасывания первой ступени, кПа; S_1 – быстрота действия первой ступени, м³/с; τ_1 – внутренняя степень сжатия первой ступени; $m_{ср}$ – показатель политропы (принимается равным в пределах $m_{ср} = 1,05 \div 1,1$) [11];

– двухступенчатого

$$\left. \begin{aligned} N_{сж1} &= p_1 S_1 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{m_{ср} - 1}{\tau_1^{m_{ср}} - 1} \right] \\ N_{сж2} &= p_2 S_2 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{m_{ср} - 1}{\tau_2^{m_{ср}} - 1} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где p_2 – давление всасывания второй ступени, кПа; S_2 – быстрота действия второй ступени, м³/с; τ_2 – внутренняя степень второй ступени.

Внутренняя степень сжатия ЖВН:

– одноступенчатого

$$\tau_1' = \frac{p_{сж1}}{p_1} = \frac{V_{max1}}{V_{min1}}, \quad (8)$$

где $p_{сж1}$ – давление сжатия первой ступени, кПа; V_{max1} , V_{min1} – объемы рабочей ячейки первой ступени соответственно до процесса сжатия и после него, м³;

– двухступенчатого

$$\left. \begin{aligned} \tau_1' &= \frac{p_{сж1}}{p_1} = \frac{V_{max1}}{V_{min1}} \\ \tau_2' &= \frac{p_{сж2}}{p_2} = \frac{V_{max2}}{V_{min2}} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где $p_{сж2}$ – давление сжатия второй ступени, кПа; $V_{\max 2}$, $V_{\min 2}$ – объемы рабочей ячейки второй ступени соответственно до процесса сжатия и после него, м³.

Для определения изменения давления газа в рабочей полости по углу поворота рабочего колеса воспользуемся расчетами процесса сжатия и законами термодинамики переменной массы [14, 23]

$$\frac{dP^\Gamma}{d\varphi} = \frac{k-1}{\omega V^\Gamma} \left[\omega \frac{dQ}{d\varphi} + P(G_I^\Gamma + G_{II}^\Gamma + G_{ок}^\Gamma) - i(G_{ут.I}^\Gamma + G_{ут.II}^\Gamma) - \frac{k}{k-1} \omega P^\Gamma \frac{dV^\Gamma}{d\varphi} \right], \quad (10)$$

где φ – угловая координата рабочего колеса, рад; k – температурный критерий; ω – угловая скорость, с⁻¹; V^Γ – объем газовой полости, м³; dQ – тепло, передаваемое газу в рабочей полости, Дж; $G_{ок}^\Gamma$ – количество газа, находящегося в рабочей полости при полном отсечении наружной кромки окна всасывания, кг; G_I^Γ , $G_{ут.I}^\Gamma$ – количество газа, перетекающего по торцевым зазорам между лопатками и лобовинами из ячейки в ячейку, кг/с; G_{II}^Γ , $G_{ут.II}^\Gamma$ – количество газа, перетекающего по торцевым зазорам между втулкой рабочего колеса и лобовинами со стороны сжатия на сторону всасывания, кг/с; P – полная удельная энергия присоединяемых элементов, Дж/кг; i – полная удельная энергия газа в рабочей полости, Дж/кг.

Когда ЖВН работает в режиме, при котором давление нагнетания больше давления сжатия $p_n > p_{сж}$, мощность сжатия будет определяться следующим образом:

– для одноступенчатого

$$N_{сж1} = p_1 S_1 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{m_{ср} - 1}{\tau_1^{m_{ср}}} - 1 \right] \alpha', \quad (11)$$

где α' – коэффициент, учитывающий сжатие обратного потока газовой фазы;

– двухступенчатого:

$$\left. \begin{aligned} N_{сж1} &= p_1 S_1 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{m_{ср} - 1}{\tau_1^{m_{ср}}} - 1 \right] \\ N_{сж2} &= p_2 S_2 \frac{m_{ср}}{m_{ср} - 1} \left[\frac{m_{ср} - 1}{\tau_2^{m_{ср}}} - 1 \right] \alpha' \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

Мощность N_Γ , которая затрачивается на перемещение жидкостного кольца, определяется как сумма мощностей потерь в безлопаточном пространстве $N_{бл}$ и рабочем колесе N_k .

Мощности $N_{бл}$ в режиме работы одноступенчатого и двухступенчатого ЖВН определяются соответственно по формулам:

$$N_{бл1} = M_1 \frac{\omega_1}{1000}; \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{бл1} &= M_1 \frac{\omega_1}{1000} \\ N_{бл2} &= M_2 \frac{\omega_2}{1000} \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где M_1, M_2 – моменты, возникающие от силы трения жидкости в безлопаточном пространстве соответственно первой и второй ступеней, Н·м; ω_1, ω_2 – угловые скорости рабочего колеса соответственно первой и второй ступеней, c^{-1} .

Скорость жидкости по углу поворота рабочего колеса ϕ с достаточной степенью точности можно определить с помощью численного моделирования [12].

Мощности, затрачиваемые на потери в рабочем колесе N_k при работе в режимах одноступенчатого и двухступенчатого ЖВН равны соответственно:

$$N_{k1} = Q_{ж1} H_{T1} (1 - \eta_{к1} k_{\eta}) \frac{\rho_{ж}}{1000}; \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{k1} &= Q_{ж1} H_{T1} (1 - \eta_{к1} k_{\eta}) \frac{\rho_{ж}}{1000} \\ N_{k2} &= Q_{ж2} H_{T2} (1 - \eta_{к2} k_{\eta}) \frac{\rho_{ж}}{1000} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $Q_{ж1}, Q_{ж2}$ – расходы рабочей жидкости на первой и второй ступенях через рабочее колесо, кг/с; H_{T1}, H_{T2} – теоретические напоры рабочего колеса первой и второй ступеней, м; $\eta_{к1}, \eta_{к2}$ – КПД рабочего колеса первой и второй ступеней; k_{η} – коэффициент, учитывающий работу вакуум-насоса на жидкостях, имеющих вязкость больше вязкости воды; $\rho_{ж}$ – плотность рабочей жидкости, $кг/м^3$.

Мощность $N_{тр}$, которая учитывает потери в подшипниках и сальниках, не превышает 1–2 % от полной эффективной мощности N_e насоса.

Предложенная методика позволяет определять эффективную мощность ЖВН модульного типа, работающего только на первой ступени или на двух одновременно различной быстроты действия. Данный расчет учитывает параметры газовой фазы и свойства рабочей жидкости.

Для определения действительной быстроты действия двухступенчатого ЖВН модульного типа воспользуемся следующей формулой [11]:

$$S_{д2} = S_{д1} \lambda_{П2}, \quad (17)$$

где $S_{д1}$ – действительная быстрота действия первой ступени, $м^3/с$; $\lambda_{П2}$ – коэффициент, учитывающий потери во второй ступени.

Действительная быстрота действия первой ступени определяется теоретической быстротой действия с учетом потерь в первой ступени

$$S_{д1} = S_{T1} \lambda_{П1}, \quad (18)$$

где S_{T1} – теоретическая быстрота действия первой ступени, $м^3/с$; $\lambda_{П1}$ – коэффициент подачи первой ступени, учитывающий возникающие потери.

Коэффициент подачи запишем следующим образом:

$$\lambda_{П1} = 1 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3, \quad (19)$$

где λ_1 – коэффициент потерь быстроты действия вследствие переноса газовой фазы со стороны нагнетания на сторону всасывания; λ_2 – коэффициент потерь вследствие перетечек газовой фазы через торцевые зазоры между ячейками; λ_3 – коэффициент потерь из-за испарения жидкости в рабочие ячейки.

Коэффициент λ_1 определяется по формуле

$$\lambda_1 = \frac{V_{м.з1} z_1}{\pi(r_{22}^2 - r_1^2) b_1 \psi}, \quad (20)$$

где $V_{м.з1}$ – объем «мертвой зоны» первой ступени, m^3 (рис. 4); z_1 – число лопаток рабочего колеса первой ступени; r_{22} – радиус внутренней поверхности жидкостного кольца, m ; r_1 – радиус ступицы рабочего колеса, m ; b_1 – ширина рабочего колеса первой ступени, m ; ψ – коэффициент для учета уменьшения величины объема рабочей ячейки из-за толщины лопаток рабочего колеса;

Эффект мертвой зоны практически полностью исключается у ЖВН с регулируемым нагнетательным окном [24] и вакуум-насосом с кинематически замкнутым корпусом и рабочим колесом [25].

Вследствие перетечек газовой фазы через торцевые зазоры между ячейками происходят потери действительной быстроты действия, учитывающиеся коэффициентом λ_2 [11, 26]. Для устранения торцевых потерь необходимо изменение конструктивной схемы подвода и отвода газовой фазы и дополнительно жидкости в ЖВН.

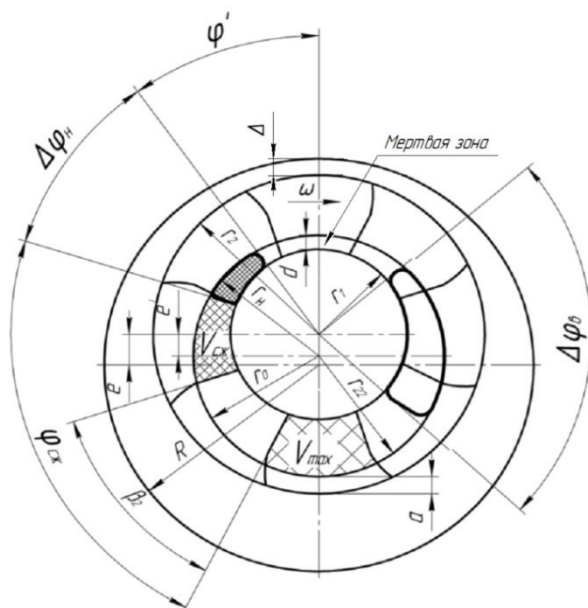


Рис. 4. Схема нагнетательного окна:

φ' – угол закрытия нагнетательного окна, рад; $\Delta\varphi_n$ – угловая координата окна нагнетания, рад; $\varphi_{сж}$ – угол поворота рабочего колеса, соответствующий зоне сжатия, рад; $\Delta\varphi_v$ – угловая координата окна всасывания, рад; Δ – наименьший зазор между рабочим колесом и корпусом насоса, m ; ω – угловая скорость вращения рабочего колеса, s^{-1} ; r_2 – внешний радиус лопаток рабочего колеса, m ; r_n – радиус внутренней поверхности жидкостного кольца в зоне нагнетания; r_0 – радиус внутренней поверхности жидкостного кольца в произвольном сечении, m ; $V_{сж}$ – объем минимальной ячейки сжатия, m^3 ; V_{max} – объем максимальной ячейки, m^3 ; R – радиус корпуса насоса, m ; d – минимальное расстояние жидкостного кольца от втулки рабочего колеса, m ; e – эксцентриситет рабочего колеса относительно корпуса насоса, m ; e' – эксцентриситет жидкостного кольца относительно рабочего колеса, m ; a – величина погружения лопаток рабочего колеса в жидкостное кольцо, m ; β_2 – угол между лопатками рабочего колеса, рад.

Потери на испарение жидкости в рабочие ячейки учитываются коэффициентом λ_3 [12]

$$\lambda_3 = \frac{V_{\text{исп}} z_1}{\pi(r_{22}^2 - r_1^2) b_1 \psi}, \quad (21)$$

где $V_{\text{исп}}$ – объем испарившейся жидкости, м³.

Тепло, передаваемое газу в рабочей полости ЖВН, рассчитывается как сумма теплоты от конденсирующегося пара, испарившейся жидкости, теплопередачи конвекцией между поверхностью жидкости и газа и элементами рабочего колеса, а также теплообмена вследствие излучения между газом, поверхностью жидкостного кольца и элементами рабочего колеса. Некоторое количество теплоты выделяется в процессе сжатия [14]. Для первой ступени уравнение суммарной теплоты будет иметь вид

$$dQ = dQ_{u1} + dQ_{k1} + dQ_{\text{кон}1} + dQ_{\text{л}1} + dQ_{\text{р.с}1}, \quad (22)$$

где dQ_{u1} , dQ_{k1} , $dQ_{\text{кон}1}$, $dQ_{\text{л}1}$ – количество теплоты, Дж, выделяемой соответственно испарившейся жидкостью, конденсирующимся паром, конвективным теплообменом, лучистым теплообменом; $dQ_{\text{р.с}1}$ – количество теплоты, полученное в процессе сжатия, Дж.

Аналогично вычисляется количество теплоты, передаваемое газу в рабочей полости ЖВН на второй ступени.

Термодинамические свойства влажного воздуха, влияющие на интенсивность испарения, учитываются критерием Гухмана. Влияние конкретных факторов на протекание процессов тепло- и массообмена учитываются критериями Архимеда и Прандтля. Конвективный теплообмен между жидкой средой и поверхностью твердого тела характеризуется критерием Нуссельта.

После определения удельной мощности необходимо провести расчет расхода дополнительной жидкости.

Заключение

Одним из наиболее важных тепломассообменных процессов, в которых используется ЖВН, является сушка различных материалов. Экспериментально установлено, что для двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки целесообразно использовать жидкостнокольцевой вакуум-насос с возможностью отключения второй ступени. Разработана методика расчета удельной мощности двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуум-насоса модульного типа с возможностью отключения второй ступени для ДКВИС с учетом влияния тепловых процессов, происходящих как в насосе, так и сушильной установке. Перспективой дальнейших исследований является изучение особенностей применения жидкостнокольцевого вакуум-насоса с кинематическим замыканием.

Список литературы

1. Фролов, Е. С. Вакуумная техника : справ. / Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А. Т. Александрова [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 359 с.
2. Иванов, В. И. Вакуумная техника : учеб. пособие / В. И. Иванов. – СПб. : Университет ИТМО, 2016. – 129 с.
3. Rodionov, Yu. V. Liquid Ring Vane Vacuum Pumps. Trends in Development of Vacuum Technology / Yu. V. Rodionov // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 3-2. – С. 779 – 784.

4. Райзман, И. А. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы и компрессоры / И. А. Райзман – Казань : Казанский гос. техн. ун-т, 1995. – 258 с.
5. Novel Construction of Liquid Ring Vacuum Pumps / Yu. V. Rodionov, Yu. T. Selivanov, D. V. Nikitin [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – Т. 55, № 5-6. – С. 473 – 479. doi: 10.1007/s10556-019-00648-z
6. Effects of Drying and Grinding in Production of Fruit and Vegetable Powders: A Review / M. C. Karam, J. Petit, D. Zimmer [et al.] // Journal of Food Engineering. – 2016. – Vol. 188. – P. 32 – 49.
7. Комбинированная вакуум-импульсная сушка растительного материала / А. И. Скоморохова, Ю. В. Родионов, О. А. Зорина, Э. С. Иванова // Инновационные технологии и технические средства для АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 12–13 ноября 2020 г., Воронеж. – Воронеж, 2020. – С. 252 – 255.
8. Родионов, Ю. В. Обоснование выбора вакуумных насосов для конвективной вакуумной ступени сушки растительных материалов / Ю. В. Родионов, В. Г. Однолько, И. В. Попова // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2009. – № 6 (20). – С. 106 – 110.
9. Обеспечение длительного хранения плодово-овощной продукции вакуумным способом с предварительной обработкой озоном / С. В. Мищенко, В. Г. Однолько, Ю. В. Воробьев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 2. – С. 598 – 604.
10. Родионов, Ю. В. Влияние конструктивных технологических параметров на эффективность работы жидкостнокольцевых вакуум-насосов / Ю. В. Родионов, М. М. Свиридов, Д. В. Никитин // Изв. высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2007. – Т. 50, № 5. – С. 102 – 104.
11. Родионов, Ю. В. Совершенствование теоретических методов расчета и обоснование параметров и режимов жидкостнокольцевых вакуумных насосов с учетом особенностей технологических процессов в АПК : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Родионов Юрий Викторович. – Тамбов, 2013. – 434 с.
12. Никитин, Д. В. Совершенствование конструкций и обеспечение заданных эксплуатационных характеристик жидкостнокольцевых вакуум-насосов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Никитин Дмитрий Вячеславович. – Тамбов, 2010. – 158 с.
13. Особенности расчета двухступенчатого жидкостнокольцевого вакуум-насоса модульного типа с последовательным включением ступеней / Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, В. А. Преображенский [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 696 – 702.
14. Галич, В. П. Исследование рабочего процесса жидкостно-кольцевых машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Галич Виктор Петрович. – Казань, 1980. – 162 с.
15. Попова, И. В. Комбинированная конвективно-вакуум-импульсная сушка – качественная переработка сельскохозяйственной продукции / И. В. Попова, Ю. В. Родионов, А. А. Флаат // Качество науки – качество жизни : материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф., 26–27 февраля 2008 г., Тамбов. – Тамбов, 2008. – С. 156–157.
16. Повышение энергоэффективности двухступенчатой КВИС растительного сырья / А. В. Щегольков, А. С. Зорин, Ю. В. Родионов, А. Б. Гриднев // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства : сб. тр. Междунар. науч.-техн. семинара, посвященного 75-летию со дня рождения К. А. Тимирязева, 22–23 мая 2018 г., Москва. – М., 2018. – С. 181 – 185.
17. Исследование и выбор режимных параметров сушки чеснока сорта «Юбилейный Грибовский» / Э. С. Иванова, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2019. – № 4. – С. 67 – 73.

18. Инновационные технологии сушки растительного сырья / Ю. Г. Скрипников, М. А. Митрохин, Е. П. Ларионова [и др.] // *Вопр. соврем. науки и практики*. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 3 (41). – С. 371 – 376.
19. Зорин, А. С. Совершенствование технологии и технических средств комбинированной вакуумной сушки растительного сырья для производства чипсов : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Зорин Александр Сергеевич. – Тамбов, 2019. – 156 с.
20. Иванова, Е. П. Разработка технологии приготовления сухой закваски на основе растительного сырья для производства хлебобулочных изделий функционального назначения : дис. ... канд. с.-хоз. наук : 05.18.01 / Иванова Екатерина Петровна. – Мичуринск, 2016. – 152 с.
21. Пат. 2343316 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Двухступенчатая жидкостно-кольцевая машина / Ю. В. Воробьев, В. А. Максимов, В. В. Попов, Ю. В. Родионов, М. М. Свиридов ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГТУ». – № 2007115026/06 ; заявл. 20.04.2007 ; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1. – 5 с.
22. Пат. 2551449 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Двухступенчатая жидкостно-кольцевая машина / А. А. Гуськов, Д. В. Никитин, П. С. Платицин, Ю. В. Родионов ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГТУ». – № 2014127083/06 ; заявл. 02.07.2014 ; опубл. 27.05.2015, Бюл. № 15. – 6 с.
23. Мамонтов, М. А. Основы термодинамики тела переменной массы / М. А. Мамонтов. – Тула : Приокское книжное издательство, 1970. – 89 с.
24. Пат. 2303166 Российская Федерация, МПК F04C 15/00. Жидкостно-кольцевая машина с автоматическим регулированием проходного сечения нагнетательного окна / А. В. Волков, Ю. В. Воробьев, Д. В. Никитин, В. В. Попов, Ю. В. Родионов, М. М. Свиридов ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГТУ». – № 2005116616/06 ; заявл. 31.05.2005 ; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20. – 6 с.
25. Пат. 2492360 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Жидкостно-кольцевая машина / П. А. Галкин, А. С. Зорин, Д. В. Никитин, А. А. Нищев, Ю. В. Родионов, М. В. Сычев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ТГТУ», ООО «Навакс». – № 2011144960/06 ; заявл. 07.11.2011 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. – 7 с.
26. Сакун, И. А. Винтовые компрессоры : основы теории, расчет, конструкция / И. А. Сакун. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1970. – 400 с.
27. Influence of Heat and Mass Exchange in a Liquid Ring Vacuum Pump on its Working Characteristics / E. V. Osipov, E. Sh. Telyakov, R. M. Latyipov, D. Bugembe // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2019. – Vol. 92, No. 4. – P. 1055 – 1063.

Liquid Ring Vacuum Pumps for Heat and Mass Transfer Processes

D. V. Nikitin¹, Yu. V. Rodionov¹, M. A. S. Makhmud¹,
A. I. Skomorokhova², A. N. Pakhomov³, A. S. Zorin⁴

*Departments of Mechanics and Engineering Graphics (1), rodionow.u.w@rambler.ru;
Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (2);
Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (3), TSTU, Tambov;
LLC “3-line” (4), Rasskazovo, Tambov region, Russia*

Keywords: liquid ring vacuum pump; material balance; heat balance; heat exchange.

Abstract: The paper examines the calculation of a liquid ring vacuum pump, using the example of the drying process of various materials. It was found that for two-stage convective vacuum-impulse drying it is economically efficient to use a two-stage liquid ring vacuum pump with the ability to turn off the second stage. A method for calculating the specific power of one-stage and two-stage liquid ring vacuum pumps, taking into account heat and mass transfer and thermal processes that occur during operation is proposed.

References

1. Frolov Ye.S., Minaychev V.Ye., Aleksandrova A.T. [et al.] *Vakuumnaya tekhnika: spravochnik* [Vacuum technology: a reference book], Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, 359 p. (In Russ.)
2. Ivanov V.I. *Vakuumnaya tekhnika: uchebnoye posobiye* [Vacuum technology: a tutorial], St. Petersburg: Universitet ITMO, 2016, 129 p. (In Russ.)
3. Rodionov Yu.V. Liquid Ring Vane Vacuum Pumps. Trends in Development of Vacuum Technology, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 3-2, pp. 779-784. (In Eng., abstract in Russ.)
4. Rayzman I.A. *Zhidkostnokol'tsevyye vakuumnyye nasosy i kompressory* [Liquid ring vacuum pumps and compressors], Kazan: Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 1995, 258 p. (In Russ.)
5. Rodionov Yu.V., Selivanov Yu.T., Nikitin D.V., Sychev M.V., Kombarova P.V. Novel Construction of Liquid Ring Vacuum Pumps, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, vol. 55, no. 5-6, pp. 473-479, doi: 10.1007/s10556-019-00648-z
6. Karam M.C., Petit J., Zimmer D., Baudelaire E.N., Scher J. Effects of Drying and Grinding in Production of Fruit and Vegetable Powders: A Review, *Journal of Food Engineering*, 2016, vol. 188, pp. 32-49.
7. Skomorokhova A.I., Rodionov Yu.V., Zorina O.A., Ivanova E.S. *Innovatsionnyye tekhnologii i tekhnicheskkiye sredstva dlya APK* [Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex], Proceedings of the International Scientific Practical Conference, 12–13 November, 2020, Voronezh, 2020, pp. 252-255. (In Russ.)
8. Rodionov Yu.V., Odnol'ko V.G., Popova I.V. [Justification of the choice of vacuum pumps for the convective vacuum stage of drying plant materials], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2009, no. 6 (20), pp. 106-110. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Mishchenko S.V., Odnol'ko V.G., Vorob'yev Yu.V. [et al.] [Provision of long-term storage of fruit and vegetable products by vacuum method with preliminary treatment with ozone], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2007, vol. 13, no. 2, pp. 598-604. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Rodionov Yu.V., Sviridov M.M., Nikitin D.V. [Influence of design technological parameters on the efficiency of liquid ring vacuum pumps], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2007, vol. 50, no. 5, pp. 102-104. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Rodionov Yu.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2013, 434 p. (In Russ.)
12. Nikitin D.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2010, 158 p. (In Russ.)

13. Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Preobrazhenskiy V.A., Zorin A.S., Baranov A.A. [Features of the calculation of a two-stage liquid ring vacuum pump of modular type with sequential switching of stages], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 696-702. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Galich V.P. *PhD Dissertation (Technical)*, Kazan, 1980, 162 p. (In Russ.)
15. Popova I.V., Rodionov Yu.V., Flaata A.A. *Kachestvo nauki - kachestvo zhizni* [Quality of science - quality of life], Proceedings of the 4th International Scientific Practical Conference, 26-27 February, 2008, Tambov, 2008, pp. 156-157. (In Russ.)
16. Shchegol'kov A.V., Zorin A.S., Rodionov Yu.V., Gridnev A.B. *Sushka, khraneniye i pererabotka produktsii rasteniyevodstva* [Drying, storage and processing of crop production], Proceedings of Works of the International Scientific and Technical Seminar dedicated to the 75th birthday of K.A. Timiryazev, 22-23 May, 2018, Moscow, 2018, pp. 181-185. (In Russ.)
17. Ivanova E.S., Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Danilin S.I., Ratushnyy A.S. [Research and selection of regime parameters for drying garlic varieties "Yubileiny Gribovskiy"], *Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK - produkty zdorovogo pitaniya* [Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex - healthy food products], 2019, no. 4, pp. 67-73. (In Russ., abstract in Eng.)
18. Skripnikov Yu.G., Mitrokhin M.A., Larionova Ye.P., Rodionov Yu.V., Zorin A.C. [Innovative technologies for drying vegetable raw materials], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. 3 (41), pp. 371-376. (In Russ., abstract in Eng.)
19. Zorin A.S. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2019, 156 p. (In Russ.)
20. Ivanova E.P. *PhD Dissertation (Agricultural)*, Michurinsk, 152 p. (In Russ.)
21. Vorob'yev Yu.V., Maksimov V.A., Popov V.V., Rodionov Yu.V., Sviridov M.M. *Dvukh-stupenchataya zhidkostno-kol'tsevaya mashina* [Two-stage liquid ring machine], Russian Federation, 2009, Pat. 2343316. (In Russ.)
22. Gus'kov A.A., Nikitin D.V., Platitsin P.S., Rodionov Yu.V. *Dvukh-stupenchataya zhidkostno-kol'tsevaya mashina* [Two-stage liquid ring machine], Russian Federation, 2015, Pat. 2551449. (In Russ.)
23. Mamontov M.A. *Osnovy termodinamiki tela peremennoy massy* [Fundamentals of thermodynamics of a variable mass body], Tula: Priokskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1970, 89 p. (In Russ.)
24. Volkov A.V., Vorob'yev Yu.V., Nikitin D.V., Popov V.V., Rodionov Yu.V., Sviridov M.M. *Zhidkostno-kol'tsevaya mashina s avtomaticheskim regulirovaniyem prokhodnogo secheniya nagnetatel'nogo okna* [Liquid ring machine with automatic regulation of the flow section of the injection window], Russian Federation, 2007, Pat. 2303166. (In Russ.)
25. Galkin P.A., Zorin A.S., Nikitin D.V., Nishchev A.A., Rodionov Yu.V., Sychev M.V. *Zhidkostno-kol'tsevaya mashina* [Liquid-bone-ring machine], 2013, Pat. 2492360. (In Russ.)
26. Sakun I.A. *Vintovyye kompressory: osnovy teorii, raschet, konstruktsiya* [Screw compressors: theory bases, calculation, design], Moscow: Mashinostroyeniye, 1970, 400 p. (In Russ.)
27. Osipov E.V., Telyakov E.Sh., Latiypov R.M., Bugembe D. Influence of Heat and Mass Exchange in a Liquid Ring Vacuum Pump on its Working Characteristics, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 4, pp. 1055-1063.

Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen für Wärme- und Massenaustausch-Prozesse

Zusammenfassung: Es ist die Berechnung einer Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe am Beispiel des Trocknungsprozesses verschiedener Materialien betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass es für die zweistufige konvektive Vakuum-Impulstrocknung wirtschaftlich sinnvoll ist, eine zweistufige Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe mit der Möglichkeit, die zweite Stufe abzuschalten, zu verwenden. Es ist ein Verfahren zur Berechnung der spezifischen Leistung von ein- und zweistufigen Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen unter Berücksichtigung des Wärme- und Stoffübergangs sowie der im Betrieb auftretenden thermischen Prozesse vorgestellt.

Pompes à vide à anneau liquides pour le transfert de chaleur et de masse

Résumé: Est examiné le calcul de la pompe à vide à anneau liquide à l'exemple du processus de séchage des divers matériaux. Est établi que pour le séchage par convection sous vide à deux étages, il est économiquement efficace d'utiliser une pompe à vide à anneau liquide à deux étages avec la possibilité de désactiver le deuxième étage. Est présentée une méthode de calcul de la puissance spécifique des pompes à vide à anneau liquide à un étage et à deux étages en tenant compte du transfert de chaleur et des processus thermiques qui se produisent pendant le fonctionnement.

Авторы: *Никитин Дмитрий Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика»; *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; *Махмуд Мохаммед Али Сами* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Скоморохова Анастасия Игоревна* – магистрант; *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов; *Зорин Александр Сергеевич* – генеральный директор ООО «3-лайн», г. Рассказово, Тамбовская область, Россия.

Рецензент: *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.