

УДК 621.514

Анализ процесса нагнетания холодильного винтового компрессора на различных хладагентах

Д-р техн. наук, профессор Носков А.Н.,

Потапова Д.В., dn.noskoff@rambler.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Рассматриваются два этапа процесса нагнетания при давлении внутреннего сжатия ниже давления нагнетания. Рассмотрена работа компрессора в составе среднетемпературной холодильной машины на хладагентах R717 и R404a. Приведены зависимости индикаторного КПД компрессора, относительной потери работы компрессора в процессе нагнетания, относительной потери работы компрессора в процессе натекания хладагента в парную полость из камеры нагнетания от геометрической степени сжатия. В режиме среднетемпературной холодильной машины энергетическая эффективность работы винтового компрессора на хладагенте R717 выше, чем на R404a при всех геометрических степенях сжатия.

Ключевые слова: холодильный винтовой компрессор, процесс нагнетания, R717 и R404a.

Discharge process analysis of screw refrigeration compressor with different refrigerants

D.Sc. Noskov A.N., Potapova D.V. dn.noskoff@rambler.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Two stages of process when internal pressure is lower then discharge pressure is considered. Considered compressor operation composed of medium-temperature chiller at refrigerant R717 and R404a. Provides efficiency indicators, relative resistance in discharge process, relative energy loss in inflow process from discharge port depending on volume ratio. In medium-temperature chiller mode energy efficiency of screw compressor on refrigerant R717 above then on R404a of all volume ratios.

Key words: screw refrigeration compressor, discharge process, R717 and R404a.

На энергетические показатели работы холодильного винтового компрессора существенное влияние оказывают процессы сжатия и нагнетания.

Наибольшее распространение в холодильной технике в настоящее время нашли маслозаполненные винтовые компрессоры (ВКМ). Процесс сжатия в холодильном ВКМ протекает в два этапа. Первый этап происходит с момента начала сокращения объема парной полости (ПП) до момента соединения этой полости с окном нагнетания. Второй этап происходит с момента соединения парной полости с окном нагнетания, до момента достижения давлением в этой полости давления в камере нагнетания. Далее следует процесс нагнетания (выталкивания), который продолжается до полного сокращения объема парной полости [1,2].

Анализ индикаторных диаграмм действительного рабочего процесса холодильного ВКМ показывает, что характер протекания второго этапа процесса сжатия и процесса нагнетания в значительной мере определяется соотношением давления в парной полости в момент ее соединения с окном и давления p_a и давления нагнетания p_n [2]. Наиболее часто встречается режим работы ВКМ,

при котором $p_a < p_n$. В этом случае, на втором этапе сжатия, происходит натекание рабочего вещества в парную полость через раскрывающееся окно нагнетания. Этот процесс происходит от угла поворота ведущего (ВЩ) винта, соответствующего соединению полости с окном нагнетания, т.е. угла сжатия φ_{1c} , до угла, на котором происходит выравнивание давлений в парной полости и в окне нагнетания – φ_6 . Затем происходит выталкивание рабочего вещества из парной полости в камеру нагнетания. Этот процесс происходит на угле поворота ВЩ винта от φ_6 до φ_c .

Процесс выталкивания сопровождается потерями давления, т.е. среднее по углу поворота давление в рассматриваемой парной полости будет больше давления нагнетания на величину Δp_n .

Метод определения изменения параметров рабочего вещества ВКМ на первом этапе процесса сжатия приведен в работе [3]. Метод учитывает увеличение давления в ПП в результате сокращения объема, протечек и утечек хладагента из сопряженных парных полостей, тепло и массообмена между паром рабочего вещества и маслом. Расчет параметров щелей, соединяющих парную полость с сопряженными ПП производился по [4]

На втором этапе сжатия в парную полость поступает дополнительная масса пара из камеры нагнетания [1]

$$dG_{нат} = \mu_{нат} \cdot c_{нат} \cdot F_{он} \cdot \rho_n \cdot dt,$$

где $\mu_{нат}$ - коэффициент расхода при натекании рабочего вещества в парную полость (ПП) через нагнетательное окно; $F_{он}$ - текущее значение суммарной площади цилиндрической и торцевой части окна нагнетания в функции угла поворота ВЩ винта; ρ_n - плотность пара в камере нагнетания. В качестве модельной скорости принималась скорость потока пара при адиабатном течении.

Среднее значение коэффициента расхода при натекании пара в ПП из окна нагнетания в зависимости от числа Рейнольдса определялось по формуле [1]

$$\mu_{нат} = 0,146 \cdot 10^{-2} \sqrt[3]{Re + 0,24 \cdot 10^3} + 0,1.$$

Расчет изменения параметров состояния хладагента на этом этапе производится по тем же зависимостям, что и на первом этапе процесса сжатия [3], но с учетом натекающего из окна нагнетания пара.

После того, как давление в парной полости достигнет давления в камере нагнетания, начнется выталкивание пара через нагнетательное окно, при этом давление в парной полости будет выше давления нагнетания на величину потерь Δp_n .

Потеря давления в процессе выталкивания оценивалась посредством коэффициента сопротивления ξ_n , определяемого по формуле [1]

$$\Delta p_n = \xi_{выт} \cdot \frac{\rho_n \cdot c_{выт}^2}{2}, \tag{1}$$

где ρ_n - плотность пара хладагента по условиям нагнетания; $c_{выт}$ - средняя скорость выталкивания смеси из полости в рассматриваемом процессе.

Средняя скорость выталкивания смеси из полости в рассматриваемом процессе [1]

$$c_{\text{выт}} = \lambda \cdot w_n \cdot \frac{\rho_{\text{вс}}}{\rho_n} \cdot \frac{2\pi n_1}{\int_{\varphi_в}^{\varphi_с} F_{\text{он}} \varphi_1 d\varphi_1},$$

где λ - коэффициент подачи компрессора; w_n - полезный объем парной полости; $\rho_{\text{вс}}$ - удельная плотность пара по условиям всасывания; n_1 - частота вращения ВЩ винта.

В результате обработки индикаторных диаграмм рабочего процесса ВКМ получена зависимость $\xi_{\text{выт}}$ от критерия Re [1]

$$\xi_{\text{выт}} = \frac{6,857 \cdot 10^6}{Re + 121,7 \cdot 10^3}.$$

По методу представленному в работах [1...5] был произведен расчет рабочего процесса холодильного ВКМ, работающего на различных рабочих веществах, и построена расчетная индикаторная диаграмма винтового компрессора.

Были определены следующие величины, характеризующие работу компрессора, в зависимости от геометрической степени сжатия ε_{Γ} .

Индикаторный КПД компрессора

$$\eta_i = L_s / L_i,$$

где L_s - работа компрессора при изоэнтропном сжатии; L_i - индикаторная работа компрессора, определенная по площади индикаторной диаграммы.

Относительной потери работы компрессора в процессе нагнетания

$$\Delta \bar{L}_n = \Delta L_n / L_i,$$

где ΔL_n определялась по величине площади на расчетной индикаторной диаграмме, соответствующей процессу выталкивания.

Потеря работы компрессора из-за процесса натекания $\Delta L_{\text{нат}}$ в случае, когда $p_a < p_n$, определялась как разница площади индикаторной диаграммы с учетом и без учета натечек из окна нагнетания. Величина $\Delta \bar{L}_{\text{нат}}$ определялась аналогично величине $\Delta \bar{L}_n$,

Расчеты были произведены для винтового компрессора имеющего следующие основные геометрические характеристики.

Соотношение числа зубьев ведущего и ведомого винтов 5/6; внешний диаметр ведущего винта 137,5 мм; внешний диаметр ведомого винта 107,6 мм; относительная длина винтов 1,46; ход ведущего вита 215 мм; полезный объем парной полости 326,4 см³; частота вращения ведущего винта 49 с⁻¹; профили зубьев винтов выполнены по [6].

Расчеты были проведены при работе компрессора на озонобезопасных хладагентах R717 и R404a.

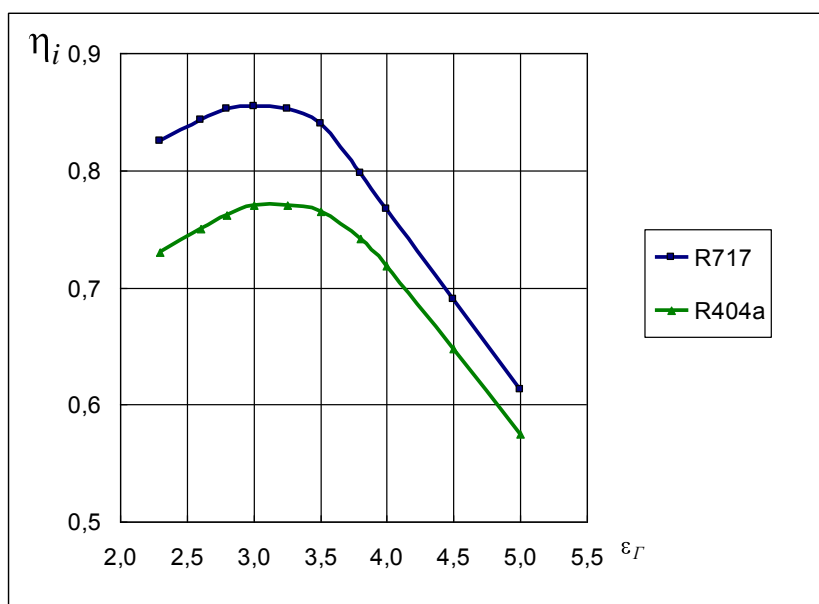


Рис. 1. Зависимость индикаторного КПД компрессора η_i от геометрической степени сжатия ϵ_Γ

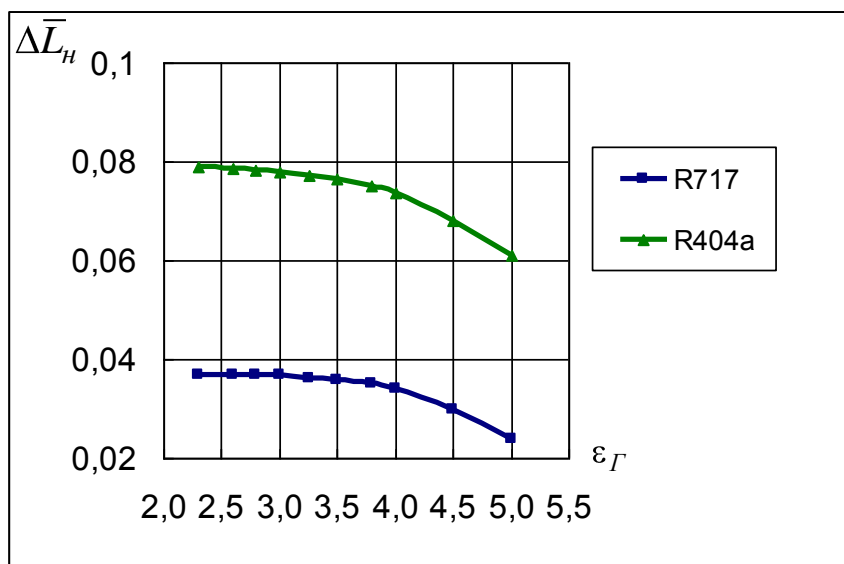


Рис. 2. Зависимость относительной потери работы компрессора в процессе нагнетания $\Delta \bar{L}_H$ от геометрической степени сжатия ϵ_Γ

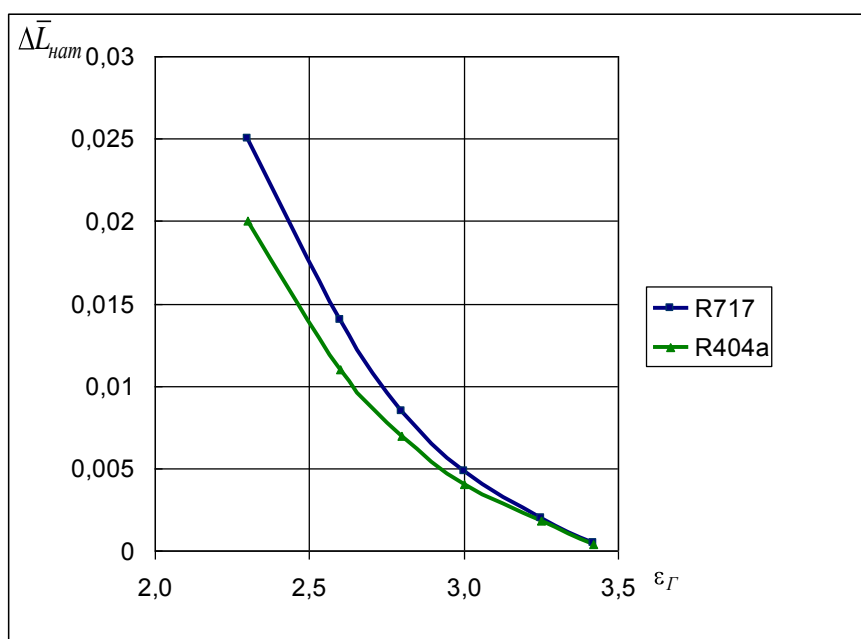


Рис. 3. Зависимость относительной потери работы компрессора в процессе натекания $\Delta \bar{L}_{нат}$ от геометрической степени сжатия ε_{Γ}

Были выбраны следующие режимы работы компрессора [7,8].

Режим работы компрессора в составе среднетемпературной холодильной машины на хладагентах R717 и R404a: температура кипения – 15 °С, температура конденсации +30 °С. Аммиак и хладон R22 широко используются в промышленных холодильных установках. При работе ВКМ на этом температурном режиме был рассмотрен смесевый хладагент R404a, так как в настоящее время он находит применение в качестве альтернативы R22.

При расчете термодинамических и теплофизических параметров хладагентов использовались работы [9...13].

Результаты расчетов приведены на рис. 1,2,3.

Выполненные расчеты показали, что в режиме среднетемпературной холодильной машины энергетическая эффективность работы винтового компрессора на хладагенте R717 выше, чем на R404a при всех геометрических степенях сжатия, прежде всего из-за большей потери давления при нагнетании хладагента R404a вследствие большей его плотности в процессе выталкивания.

Полученные данные позволяют более обосновано подойти к выбору озонобезопасных хладагентов при работе винтового компрессора на различных режимах.

Список литературы

1. Носков А.Н., Зверев Д.И., Тарасенков Д. Расчет процесса нагнетания маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014. №1.
2. Носков А.Н. Расчет процесса сжатия холодильного винтового компрессора // Компрессорная техника и пневматика. –1997. – № 1–2. – С. 35-39.
3. Носков А.Н., Зимков А.А. Расчет процесса сжатия маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2013. №1.

4. *Носков А.Н.* Расчет изменения зазоров между профильными поверхностями винтового компрессора // Вестник Международной академии холода. 2013. № 3. С. 27–30.
5. *Носков А. Н., Зимков А.А.* Расчет процесса всасывания маслозаполненного холодильного винтового компрессора // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2012. №1.
6. Пат. 2109170 России, МКИ F 04 C 18/16. Зубчатое зацепление винтового компрессора / Носков А.Н. 1998. – Бюл. №11.
7. *Бараненко А.В., Калюнов В.С., Румянцев Ю.Д.* Практикум по холодильным установкам – СПб.: Профессия, 2001. -270 с.
8. *Крупененков Н.Ф.* К вопросу применения эффекта Ранка-Хильша (вихревая труба) на предприятиях по производству колбасных изделий // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 1. С. 23.
9. *Бараненко А.В.* Итоги работы МАХ в в 2012 - 2013 годах // Вестник Международной академии холода
10. *Бухарин Н.Н.* Моделирование характеристик центробежных компрессоров. Л.: Машиностроение. 1983. –214 С.
11. *Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Демина Л.Ю.* Единое уравнение состояния R717, учитывающее особенности критической области // Вестник Международной академии холода. 2009. № 4. С. 29–32.
12. *Рыков С.В., Самолетов В.А., Рыков В.А.* Линия насыщения аммиака // Вестник Международной академии холода. 2008. № 4. С. 20–21.
13. *Тимофеев Б.Д., Николаев В.А., Нагула П.К.* Модифицированные озонобезопасные смесевые хладагенты – заменители R22 // Вестник Международной академии холода. 2014. № 1. С. 16–18. . 2013. № 2. С.3–12.