

Расчет процесса всасывания маслозаполненного холодильного винтового компрессора

Носков А.Н., Зимков А.А.

dn.noskoff@rambler.ru

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики
институт холода и биотехнологий

Приведена методика расчета процесса всасывания винтового компрессора, учитывающая особенности холодильного маслозаполненного компрессора. Приводится сравнение экспериментальных и расчетных характеристик компрессора.

Ключевые слова: холодильный винтовой компрессор, процесс всасывания

Calculation of suction process of wet screw refrigeration compressor

Noskov A.N., Zimkov A.A.

Institute of Refrigeration and Biotechnology

Calculation method for the suction of screw compressor, which takes into account peculiarities of oil-filled refrigeration compressor is given. Also is given experimental and calculated characteristics of the compressor.

Key words: wet screw refrigeration compressor, suction process

Процесс всасывания оказывает существенное влияние на объемные и, следовательно, энергетические показатели работы холодильного винтового маслозаполненного компрессора (ВКМ).

Наличие зазоров между рабочими органами компрессора приводит массообмену и соответствующему обмену энергией между парными полостями (ПП), находящимися в процессе сжатия и в процессе всасывания, а также к тепло и массообмену между всасываемым паром хладагента и маслофреоновым раствором.

Характерной особенностью действительного процесса всасывания холодильного винтового компрессора является наличие утечек, которые существенно влияют на его объемные показатели.

Так как винтовой компрессор в составе паровой холодильной машины работает с холодильными агентами, близкими к состоянию насыщенного пара, другой особенностью рабочего процесса является необходимость использования уравнений для реального газа, сжимаемого компрессором.

При расчете процесса всасывания ВКМ предполагаем, что пар хладагента и маслофреоновая смесь мгновенно перемешиваются в процессе всасывания и находятся в состоянии равновесия.

В процессе всасывания ВКМ имеют место различные потери, отрицательно влияющие на его коэффициент подачи. В парную полость, находящуюся в процессе всасывания, поступают утечки пара хладагента и маслофреонового раствора из полостей, находящихся в процессе сжатия. Эти утечки занимают часть объема ПП и повышают температуру свежей порции пара. Маслофреоновый раствор, подаваемый на подшипники, торцевое уплотнение и разгрузочные устройства сливается в камеру всасывания и поступает затем во впадины винтов. Вследствие падения давления этого раствора, из него выделяется пар хладагента. Этот маслофреоновый раствор и пар хладагента называют балластным рабочим веществом. Влияние балластного рабочего вещества на коэффициент подачи ВКМ аналогично влиянию утечек пара хладагента. Маслофреоновый раствор балластного рабочего вещества и утечек занимает часть объема ПП, что также уменьшает коэффициент подачи.

Уравнения массового баланса в процессе всасывания [6]:

$$\begin{aligned} G_a + G_{a.y} + G_{a.б} + G_{mp.y} + G_{mp.б} &= G'_a + G'_{mp}; \\ G'_a &= G_a + G_{a.y} + G_{a.б}; \\ G'_{mp} &= G_{mp.y} + G_{mp.б}, \end{aligned} \quad (1)$$

где G_a - масса пара хладагента, поступившая в ПП из камеры всасывания; $G_{a.y}$, $G_{a.б}$ - масса пара хладагента утечек и балластного рабочего вещества, соответственно; $G_{mp.y}$, $G_{mp.б}$ - масса маслофреонового раствора утечек и балластного рабочего вещества, соответственно; G'_a , G'_{mp} - масса пара хладагента и маслофреонового раствора в конце процесса всасывания, соответственно.

Уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} G'_a \cdot i_{a.вс} + G'_{mp} \cdot i'_{mp} &= G_a \cdot i_{a.вс} + G_{a.y} \cdot i_{a.y} + G_{a.б} \cdot i_{a.б} + \\ &+ G_{mp.y} \cdot i_{mp.y} + G_{mp.б} \cdot i_{mp.б} \end{aligned}, \quad (2)$$

где $i'_{a\cdot вс}$, $i'_{мп}$ - энтальпия пара и маслофреонового раствора в конце процесса всасывания, соответственно; $i_{a\cdot вс}$ - энтальпия всасываемого хладагента; $i_{a\cdot у}$, $i_{мп\cdot у}$ - энтальпия пара утечек хладагента и маслофреонового раствора утечек, соответственно; $i_{a\cdot б}$, $i_{мп\cdot б}$ - энтальпия балластного пара хладагента и балластного маслофреонового раствора, соответственно.

При определении энтальпий считаем равными температуры пара и маслофреонового раствора утечек и балластного рабочего вещества, а также температуру пара и маслофреонового раствора в конце процесса всасывания.

В работах [4,5] используя массовый и тепловой баланс процесса всасывания получено зависимость для определения коэффициента подачи холодильного ВКМ

$$\lambda = \frac{G_a}{G_T} = 1 - \frac{a}{2} \frac{\sum \Delta p_v}{p_{вс}} - \frac{G_{a\cdot у}}{G_T} \cdot \frac{i_{a\cdot у}}{i_{a\cdot вс}} - \frac{G_{a\cdot б}}{G_T} \cdot \frac{i_{a\cdot б}}{i_{a\cdot вс}} - \frac{G_{мп\cdot у}}{G_T} \cdot \frac{(i_{мп\cdot у} - i'_{мп})}{i_{a\cdot вс}} - \frac{G_{мп\cdot б}}{G_T} \cdot \frac{(i_{мп\cdot б} - i'_{мп})}{i_{a\cdot вс}} - \frac{W'_m}{W_n} \quad (3)$$

Формула (1) может быть записана в следующем виде:

$$\lambda = 1 - \Delta\lambda_a - \sum_i \Delta\lambda_v - \Delta\lambda_{a\cdot у} - \Delta\lambda_{a\cdot б} - \Delta\lambda_{мп\cdot у} - \Delta\lambda_{мп\cdot б} - \Delta\lambda_{мп}, \quad (4)$$

где $\Delta\lambda_a$, $\Delta\lambda_v$ - уменьшение коэффициента подачи вследствие наличия градиента давления по высоте зуба; уменьшение λ вследствие потерь давления на всасывающем тракте; $\Delta\lambda_{a\cdot у}$, $\Delta\lambda_{a\cdot б}$ - уменьшение коэффициента подачи вследствие утечек пара и балластного пара хладагента; $\Delta\lambda_{мп\cdot у}$, $\Delta\lambda_{мп\cdot б}$ - уменьшение коэффициента подачи вследствие утечек маслофреонового раствора и балластного раствора; $\Delta\lambda_{мп}$ - объемная потеря вследствие уменьшения полезного объема ПП.

Значение энтальпии $i'_{мп}$ определяется из уравнения теплового баланса (2).

При расчете балластного рабочего вещества определяются $G_{a\cdot б}$, $G_{мп\cdot б}$ и T_b отдельно для каждого узла, из которого пар и маслофреоновая смесь поступают во всасывающую камеру. При этом считается, что концентрация масла на входе в узлы равна концентрации насыщенного раствора при температуре и давлении в коллекторе подачи масла, а состояние пара и маслофреоновой смеси на выходе из узла – насыщенное.

Величины $G_{a.y}$, $G_{mp.y}$ и T_y определяются расчетным путем. Параметры маслофреонового раствора перед щелями и после них определяются по состояниям в начале и конце процесса дросселирования из диаграмм $\xi_m - i$. На рис. 1 приведена $\xi_m - i$ диаграмма для жидкой фазы раствора R22 в масле ХА-30 [1], которая использовалась при расчете процесса всасывания.

Условием процесса является постоянство значений энтальпии смеси в процессе дросселирования:

$$i_{см} = const. \quad (5)$$

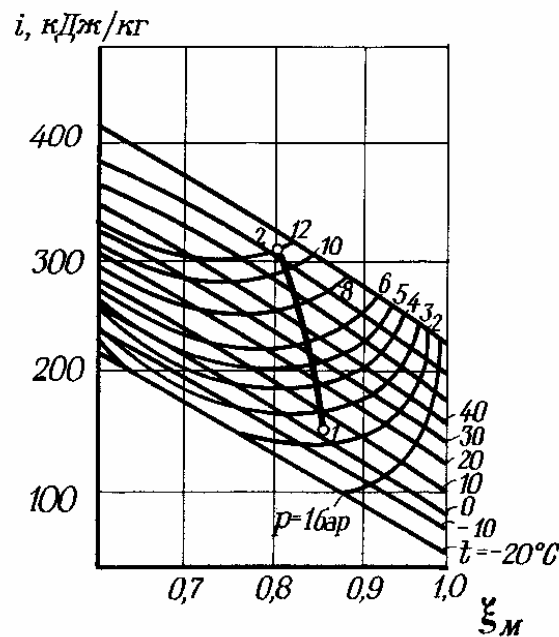


Рис. 1. Диаграмма $\xi_m - i$ для раствора R22 – масло ХА-30

Энтальпия смеси определяется по формуле

$$i_{см} = \frac{1}{1+m} \cdot i + \frac{m}{1+m_A} \cdot i_{mp},$$

где m , i , i_{mp} - относительное количество маслофреонового раствора в смеси, энтальпия пара хладагента, энтальпия маслофреонового раствора, соответственно.

При адиабатном дросселировании равновесной маслофреоновой смеси происходит испарение хладагента из раствора без подвода теплоты за счет внутренней энергии раствора, в результате чего понижается температура системы.

Энтальпия раствора определяется по формуле:

$$i_{mp} = \xi_m \cdot i_m + (1 - \xi_m) \cdot i + \Delta i_{см}^*, \quad (5)$$

где i_m , i - энтальпии чистого масла и пара хладагента, соответственно; $\Delta i_{см}^*$ - интегральная теплота смешения.

Определив по величинам давления p и температуры T энтальпию пара i , значение i_{mp} и ξ_m по диаграмме $\xi_m - i$, а также энтальпию масла по формуле $i_m = c_m \cdot T$, можно найти величину интегральной теплоты смешения $\Delta i_{см}^*$, решив относительно ее уравнение (5).

Рассмотрим процесс дросселирования равновесной смеси пара хладагента и маслофреонового раствора в количестве $G_{см.А}$ от состояния A до состояния B . По известным величинам в начале процесса дросселирования p_A , T_A , $G_{см.А}$, $\xi_{м.А}$, m_A , $i_{см.А}$ и известной величине давления в конце процесса p_B определим величины $T_B = T_y$, $G_{а.В} = G_{а.у}$ и $G_{мр.В} = G_{мр.у}$, необходимые для расчета λ .

Энтальпия смеси в конце процесса дросселирования определяется по формуле

$$i_{см.В} = \frac{1}{1 + m_B} \cdot i_B + \frac{m_B}{1 + m_B} \left[\xi_{м.В} \cdot c_m \cdot T_B + (1 - \xi_{м.В}) \cdot i_B + \Delta i_{см.В}^* \right]. \quad (6)$$

Это уравнение решается численным методом, путем варьирования температуры смеси в конце процесса дросселирования таким образом, чтобы выполнялось условие (5). Теплоту смешения $\Delta i_{см.В}^*$ определяем по методу, описанному выше. Полученное значение равновесной температуры T_B равно значению температуры утечек T_y . По величинам p_B и T_B , используя $\xi_m - i$ диаграмму раствора хладагента и масла, находим величину $\xi_{м.В}$.

Значения величин $G_{а.у}$ и $G_{мр.у}$ определяем в следующей последовательности. Количество маслофреонового раствора в смеси в начале процесса дросселирования

$$G_{мр.А} = \frac{m_A}{1 + m_A} \cdot G_{см.А},$$

где $G_{см.А}$ - количество смеси, протекшей в ПП в процессе всасывания.

Количество чистого масла в этой смеси, не изменяющееся в процессе дросселирования,

$$G_m = \xi_{м.А} \cdot G_{мр.А}.$$

Количество пара хладагента, выделившееся из раствора в процессе дросселирования,

$$\Delta G_{ар} = -G_m \cdot \frac{\xi_{м.А} - \xi_{м.В}}{\xi_{м.А} \cdot \xi_{м.В}}.$$

Количество хладагента в маслофреоновом растворе в начале процесса дросселирования

$$G_{ap.A} = (1 - \xi_{m.A}) \cdot G_{mp.A}.$$

Количество хладагента в маслофреоновом растворе в конце процесса дросселирования

$$G_{ap.B} = G_{ap.A} - \Delta G_{ap}.$$

Количество пара хладагента в смеси в начале процесса дросселирования

$$G_{ap.A} = \frac{m_A}{1 + m_A} \cdot G_{см},$$

где $G_{см} = G_{см.A} = G_{см.B}$ - количество маслофреоновой смеси в процессе дросселирования.

Количество пара хладагента в смеси в конце процесса дросселирования

$$\begin{aligned} G_{a.y} = G_{a.B} &= (G_{a.A} + G_{ap.A}) - G_{ap.B} = \\ &= G_{см} \cdot \frac{1}{1 + m_A} \cdot \left(1 - m_A \cdot \frac{\xi_{m.A} - \xi_{m.B}}{\xi_{m.B}} \right). \end{aligned}$$

Количество маслофреонового раствора в конце процесса дросселирования

$$G_{mp.y} = G_{mp.B} = G_{см} - G_{a.y}.$$

Метод определения $G_{см}$ приведён в работе [2].

На рис. 2 приведено сравнение расчётных и экспериментальных (по данным работы [3]) величин коэффициента подачи λ и изэнтропного эффективного КПД η_{se} холодильного ВКМ. Величины η_{se} рассчитывались по методу, приведенному в работе [6]. Компрессор имеет следующие основные характеристики: теоретическая объёмная производительность $V_t = 0,21 \text{ м}^3 / \text{с}$; внешние диаметры винтов $D_1 = D_2 = 204 \text{ мм}$; длина винтов $\ell_g = 214 \text{ мм}$; отношение числа зубьев ВЩ и ВМ винтов $z_1 / z_2 = 4 / 6$; профиль зубьев окружной; геометрическая степень сжатия $\varepsilon_r = 3,7$; частота вращения ВЩ винта $n_1 = 49 \text{ с}^{-1}$; профильные зазоры $0,08 \dots 0,125 \text{ мм}$; радиальные зазоры $0,12 \text{ мм}$. Компрессор работает на R22 с маслом ХА-30. Режим работы: температура конденсации $t_k = 20^\circ \text{C}$; температура на всасывании $t_g = 10^\circ \text{C}$.

Сравнение расчётных и экспериментальных характеристик холодильного ВКМ показывает, что погрешность в определении λ и η_{se} не превышает 3,5 и 6%, соответственно.

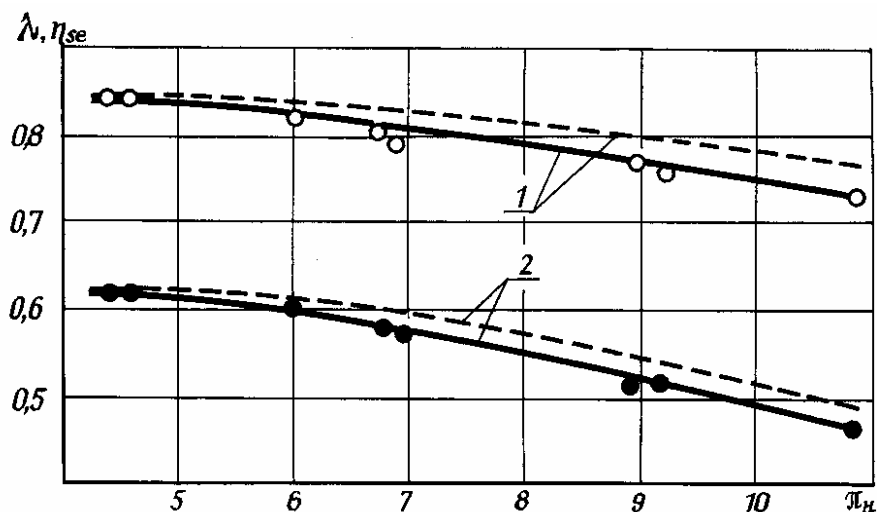


Рис. 2. Зависимость расчетных и экспериментальных величин коэффициентов подачи λ (1) и изэнтропных эффективных КПД η_{se} (2) холодильного ВКМ от степени сжатия π_k : ----- эксперимент (по данным работы [3]); - - - - расчет

Список литературы

1. Верный А.Л. Исследование и метод расчета винтовых маслозаполненных компрессоров // Процессы, технология и контроль в криогенном машиностроении. -Балашиха, 1978. -с. 72-82.
2. Исследование теплофизических свойств масел и их смесей с R22. № Гос. регистрации 74064474. -Одесса: ОТИХП, 1976. -46 с.
3. Каньшев Г.А. Объемные и энергетические характеристики винтового маслозаполненного холодильного компрессора с учетом свойств масляных растворов: Дис. ... канд. техн. наук. -М., 1980. -226 с.
4. Каньшев Г.А., Чистяков Ф.М. Влияние свойств масел на энергетические характеристики фреоновых маслозаполненных винтовых компрессоров // Холодильная техника. -1980. -№7. с. 6-10.
5. Каньшев Г.А., Чистяков Ф.М. Коэффициент подачи винтового фреонового маслозаполненного компрессора // Холодильная техника. - 1979. -№12. с. 7-12.
6. Носков А.Н. Повышение эффективности холодильных винтовых компрессоров на основе совершенствования геометрии винтов и способов регулирования производительности: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. - СПб., 2001. -32 с.