

Изменение параметров состояния пара хладагента в элементарном рабочем процессе маслозаполненного холодильного винтового компрессора

Носков А. Н., Петухов В.В.

Маслозаполненный холодильный винтовой компрессор (ВКМ) относится к компрессорам объемного принципа действия в котором сжатие происходит за счет сокращения объема парной полости (ПП).

Наличие зазоров между рабочими органами компрессора приводит массообмену и соответствующему обмену энергией между сопряженными парными полостями, а также к тепло и массообмену между паром хладагента и маслофреоновым раствором.

Таким образом, характерной особенностью действительного рабочего процесса холодильного винтового компрессора является наличие утечек и внутренних перетечек, которые существенно влияют на его объемные и энергетические показатели, что приводит к необходимости применять для расчета рабочего процесса аппарат термодинамики тела переменной массы [1].

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.

Для уплотнения зазоров между винтами и отвода теплоты сжатия в парные полости ВКМ подается масло.

В области рабочих температур растворимость пара фреона в маслах относительно высокая, поэтому участвующее в рабочем процессе масло фактически является маслофреоновым раствором.

Рассмотрим действительный элементарный рабочий процесс, происходящий в парной полости ВКМ, сжимающего фреон в течение малого отрезка времени.

В процессе сжатия происходит интенсивный тепло- и массообмен между холодильным агентом и маслофреоновым раствором.

Сжатие маслофреонового раствора с холодильным агентом является сложным процессом и его расчет возможен лишь в случае принятия допущений о характере и структуре двухфазного потока в компрессоре. Подача маслофреонового раствора в парную полость осуществляется после ее отсечения от окна всасывания, т.е. в процессе сжатия, через ряд отверстий небольшого диаметра. Впрыснутый маслофреоновый раствор дробится зубьями роторов на мелкие капли, которые распределяются в сжимаемом объеме.

Экспериментальное определение размера и концентрации капель в полости сжатия винтового компрессора представляет собой очень сложную задачу.

Если считать, что дробление капель раствора и их перемешивание со сжимаемым хладагентом происходит интенсивно, можно сделать допущение о наличии равновесия между ними.

Тепловое равновесие между маслофреоновым раствором и паром хладагента на нагнетании было подтверждено экспериментально при исследовании холодильного ВКМ на кафедре холодильных машин и НПЭ СПбГУНиПТ. Если предположить, что равновесие между хладагентом и маслом имеет место в течение всего процесса сжатия, то можно считать, что в парной полости сжимаются мелкие частицы маслофреонового раствора, находящиеся в тепловом равновесии с хладагентом. Будем считать, что объем, занимаемый маслом пренебрежимо мал, по сравнению с объемом парной полости.

Для количественной оценки изменения параметров состояния пара хладагента в рассматриваемой ПП воспользуемся первым законом термодинамики для тела переменной массы в дифференциальной форме:

$$dU = dL - dQ_{mp} - dZ_{\xi} + dZ_{nam} - dZ_{ym} + dQ_{mp} \quad (1)$$

где dU - изменение полной внутренней энергии пара хладагента в элементарном процессе; dL - внешняя работа, затраченная на сжатие хладагента, заключенного в ПП; dQ_{mp} - теплота, воспринимаемая масляным раствором; dZ_{ξ} - энергия пара хладагента, абсорбируемого масляным раствором; dZ_{nam} , dZ_{ym} - энергия хладагента натекающего в ПП и вытекающего из нее, соответственно, за рассматриваемый промежуток времени; dQ_{mp} - количество теплоты, подводимой к хладагенту в результате трения винтов о паромасляную смесь.

С учетом того, что дифференциал удельной внутренней энергии хладагента $du = \frac{\partial u}{\partial T} dT + \frac{\partial u}{\partial v} dv$, где v - удельный объем, T - температура пара, рост температуры пара в элементарном процессе сжатия

$$dT = \frac{du - (\partial u / \partial v)}{(\partial u / \partial T)}. \quad (2)$$

Дифференциал изменения полной внутренней энергии пара хладагента

$$dU = (u \cdot G) = u \cdot dG + G \cdot du,$$

где G - текущее значение массы пара в ПП.

Внешнюю работу, затраченную на сжатие хладагента, можно определить по формуле

$$dL = -p \cdot dW,$$

где P - текущее значение давления в ПП; dW - изменение объема ПП за рассматриваемый промежуток времени.

Теплота, воспринимаемая маслом

$$dQ_m = c_{mp} \cdot G_{mp} \cdot dT,$$

где c_{mp}, G_{mp} - теплоемкость и масса масляного раствора в ПП.

Энергия пара хладагента, абсорбируемого масляным раствором

$$dZ_\xi = i \cdot G_{mp} \cdot \frac{d\xi_{mp}}{\xi_{mp}^2},$$

где i - энтальпия пара хладагента; $\xi_{mp}, d\xi_{mp}$ - текущее значение концентрации масляного раствора и изменение концентрации раствора за рассматриваемый промежуток времени, соответственно.

Для расчета энергообмена между рассматриваемой и сопряженными полостями служат следующие зависимости:

$$dZ_{нам} = \sum_k i_0 dG_{нам.k};$$
$$dZ_{ym} = \sum_j i dG_{ym.j},$$

где i_0 - энтальпия пара хладагента в ПП, из которой происходит натекание в рассматриваемую парную полость; где i - текущее значение энтальпии хладагента в ПП; $dG_{нам.k}, dG_{ym.j}$ - количество хладагента, натекающего и вытекающего из ПП, соответственно, через одну из щелей за рассматриваемый промежуток времени.

Мощность трения винтов о паромасляную смесь определяется по формуле $N_{тр} = \sum N_{тр.ц} + \sum N_{тр.т}$, где $\sum N_{тр.ц}$ - мощность трения цилиндрических поверхностей винтов о паромасляную смесь; $\sum N_{тр.т}$ - мощность трения торцевых поверхностей винтов о паромасляную смесь.

Для определения мощности трения винтов о паромасляную смесь использовались зависимости, приведённые в работе [2].

Расчёты показывают, что мощность трения роторов состоит в основном из трения наружной цилиндрической поверхности перьев зубьев ведомого винта и торцевых поверхностей ведомого и ведущего винтов на стороне всасывания и нагнетания.

Принимаем, что тепловой эквивалент мощности трения равномерно распределяется между паром и маслофреоновым раствором.

Масса маслофреонового раствора, приходящаяся на 1 кг пара хладагента:

$$m = \frac{G_{mp}}{G} = \frac{G_m + G_{a.p}}{G}$$

где G_{mp} - масса маслофреонового раствора; G_m - масса чистого масла;

$G_{a.p}$ - масса хладагента, растворенного в масле; G - масса пара хладагента.

Количество теплоты, подводимой к хладагенту в результате трения винтов о паромасляную смесь

$$dQ_{mp} = \frac{N_{mp} \cdot \tau}{z_1} \cdot \frac{m}{m+1}$$

где τ - время элементарного процесса, z_1 - число заходов ведущего винта.

С учетом приведенных выше зависимостей получим выражение для расчета изменения температуры в элементарном рабочем процессе

$$dT = dT_W + dT_Q + dT_\xi + dT_{нат} + dT_{ym} + dT_{mp} \quad (3)$$

где $dT_W, dT_Q, dT_\xi, dT_{нат}, dT_{ym}, dT_{mp}$ — изменение температуры в элементарном рабочем процессе в результате сокращения объема парной полости; теплоты, воспринимаемой масляным раствором; энергии пара хладагента, абсорбируемого масляным раствором; энергии поступающей в ПП с натекающим хладагентом; энергии уходящей из ПП с вытекающим из ПП хладагентом; теплоты, подводимой к хладагенту в результате трения винтов о паромасляную смесь.

Соответствующие слагаемые прироста температуры в выражении (3) определяются по следующим зависимостям:

$$dT_W = -\frac{[p + (\partial u / \partial v)] \cdot dW}{G \cdot (\partial u / \partial T)}; \quad dT_Q = -\frac{m \cdot di_{mp}}{(\partial u / \partial T)}; \quad dT_\xi = i \cdot m \cdot \frac{(\partial \xi / \xi_m^2)}{(\partial u / \partial T)};$$

$$dT_{нат} = \frac{(i_0 - u) \cdot \sum dG_{нат}}{G \cdot (\partial u / \partial T)}; \quad dT_{ym} = -\frac{p \cdot v \cdot \sum dG_{ym}}{G \cdot (\partial u / \partial T)}; \quad dT_{mp} = \frac{dQ_{mp}}{c_v \cdot G}.$$

где c_v, i_{mp} - изохорная теплоемкость и энтальпия маслофреонового раствора, соответственно.

Дифференцируя уравнение состояния $p \cdot v = z \cdot G \cdot R \cdot T$, получим

$$dp = \frac{zGRdT + zTRdT - pdW}{W},$$

где W и dW - текущее значение объема ПП и его изменение, соответственно; z - коэффициент сжимаемости; R - газовая постоянная.

Подставив в это выражение слагаемые роста температуры в элементарном рабочем процессе и изменения массы хладагента, получим формулу для определения роста давления в элементарном рабочем процессе

$$dp = dp_W + dp_Q + dp_\xi + dp_{нат} + dp_{ym} + dp_{mp} \quad (4)$$

Соответствующие слагаемые прироста давления в выражении (4) определяются по следующим зависимостям:

$$dp_w = - \left\{ z \cdot R \cdot \frac{[p + (\partial u / \partial v)]}{(\partial u / \partial T)} + p \right\} \cdot \frac{dW}{W} \quad dp_Q = - \frac{z \cdot G \cdot R}{W} \cdot \frac{m \cdot di_{mp}}{(\partial u / \partial T)};$$

$$dp_\xi = \frac{z \cdot G \cdot R \cdot m}{W} \cdot \left[\frac{i}{(\partial u / \partial T)} + T \right] \cdot \frac{d\xi_M}{\xi_M};$$

$$dp_{нат} = \frac{z \cdot R}{W} \cdot \left[\frac{(i_0 - u)}{(\partial u / \partial T)} + T \right] \cdot \sum dG_{нат};$$

$$dp_{ym} = - \frac{z \cdot R}{W} \cdot \left[\frac{p \cdot v}{(\partial u / \partial T)} + T \right] \cdot \sum dG_{ym}; \quad dp_{mp} = \frac{z \cdot R}{W \cdot c_v} \cdot dQ_{mp}$$

На кафедре холодильных машин и низкопотенциальной энергетики СПбГУНиПТ было проведено экспериментальное исследование холодильного ВКМ. В качестве экспериментального компрессора был использован холодильный маслозаполненный винтовой компрессор ВХ-130, разработанный в СКБК г.Казань совместно с ВНИИХолодмашем. Компрессор имеет следующие основные характеристики: соотношение числа зубьев ведущего и ведомого винтов 4/6; внешний диаметр ведущего винта 160 мм; относительная длина винтов 0,9; ход ведущего вита 192 мм; полезный объем парной полости 429 см³; частота вращения ведущего винта 49 с⁻¹. В компрессоре использованы винты типоразмерного ряда СКБК для маслозаполненных винтовых компрессоров.

Были произведены расчеты изменения давления в ПП в результате действия приведенных выше факторов от угла поворота ведущего винта φ1. Расчеты производились для экспериментального компрессора, работающего на фреоне 22 с маслом ХА-30. Давление хладагента на всасывании изменялось в пределах 1,06·10⁻¹...4,98·10⁻¹ МПа, а степень повышения давления – от 2 до 6.

Выполненные расчеты показали хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных при определении изменения давления в парной полости. Погрешность при расчете изменения давления в ПП не превышает 5% по сравнению с экспериментальными данными.

Список литературы

Носков А.Н., Сакун И.А., Пекарев В.И. Исследование рабочего процесса холодильного винтового компрессора сухого сжатия // Холодильная техника. -1985. -№6. -с. 20-24.

Дорфман Л.А. Гидродинамическое сопротивление и теплопередача вращающихся тел. -М.: Физматгиз, 1960. -162 с.