

РАСЧЕТ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАСКАДНОГО ОБМЕННИКА ДАВЛЕНИЯ

Введение

Перспективной разновидностью обменников давления, применяемых в качестве агрегатов воздухо-снабжения в различных отраслях машиностроения, в том числе, в системах наддува ДВС, являются каскадные обменники давления (КОД). В отличие от апробированных волновых обменников давления (ВОД), сжатие рабочего тела в КОД осуществляется в процессе каскадного массообмена без образования волн большой интенсивности. Рабочий процесс КОД характеризуется более высокой эффективностью и меньшей чувствительностью к рассогласованию частоты вращения ротора, меньшему негативному влиянию неполноты вытеснения свежего заряда из ячеек ротора (фактора так называемого «мертвого» объема).

Принцип действия КОД иллюстрируется рис. 1, где схематизирована развертка ячеек ротора относительно газораспределительных окон и напорообменных каналов.

Поступающий через окно ГВД сжимающий газ «досжимает» предварительно сжатый в ячейке воздушный заряд и вытесняет его через окно ВВД к потребителю. Потенциальная энергия сжимающего газа, заполняющего ячейку после её разобшения с окнами высокого давления, полезно расходуется на предварительное сжатие свежего заряда в ячейках в процессе каскадного массообмена через напорообменные каналы, периодически сообщающие смежные ячейки ротора участков сжатия и расширения.

Продувка ячеек свежим зарядом осуществляется принудительным вентилированием в период их подключения к окнам низкого давления (ВНД и ГНД).

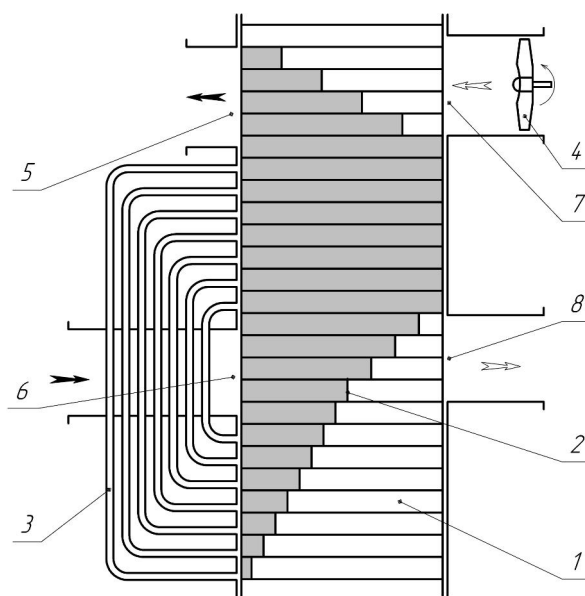


Рис. 1. Схема развертки ротора КОД относительно окон и каналов статора:
1 – ячейки ротора; 2 – условная контактная граница сжимающей и сжимаемой сред; 3 – массообменные каналы статора; 4 – продувочный вентилятор; 5 – окно газов низкого давления (ГНД); 6 – окно газов высокого давления (ГВД); 7 – окно воздуха низкого давления (ВНД); 8 – окно воздуха высокого давления (ВВД)

Постановка задачи

Моделирование рабочего процесса КОД с достаточно высокой степенью точности может быть выполнено посредством математической модели, заимствованной из расчета ВОД. Основные положения уточненной модели, подробно изложены в работе [1]. Модель основана на описании неустановившегося движения сжимаемых сред интегральными законами сохранения масс, импульсов энергии с численным решением, модернизированным методом «распад произвольного разрыва».

На этапе предварительного поиска исходных данных уточненного расчета целесообразно использование менее трудоемкого инженерного метода расчета, приемлемо отражающего основные закономерности рабочего процесса КОД.

Ниже приводятся основные положения такого расчета.

Решение задачи

Задачей упрощенного расчета является определение производительности и основных геометрических размеров КОД для заданных параметров сжимающего газа и требуемой напорности его работы.

Согласно особенностям организации рабочего процесса КОД расчет выполняется в два этапа

На первом этапе определяется давление предварительного сжатия воздуха в ячейках в процессе каскадного массообмена.

При моделировании каскадного массообмена принимается допущение о выравнивании давлений в смежных ячейках за период их сообщения посредством соответствующих напорообменных каналов. Кроме того, полагается отсутствующим влияние теплообмена и трения газов, а также параметров состояния среды в напорообменных каналах. Последнее допущение, в свою очередь, базируется на предположении незначительности колебаний давления в напорообменных каналах на установившемся режиме работы КОД.

Для вывода расчетных уравнений рассмотрим произвольную пару смежных ячеек в процессе их сообщения с напорообменным каналом (рис. 2).

В момент, предшествующий их сообщению с напорообменным каналом, в ячейке 1 участка предварительного сжатия (поз.А). в объеме V_{gi} содержится недорасширенный сжимающий газ и в объеме V_{airi} – сжимаемый воздух с общим давлением P_i^c . Смежная ячейка 2, расположенная на участке расширения в идеализированном цикле (по условию полного вытеснения сжатого воздуха в контуре высокого давления) заполнена расширяющимися газами с давлением P_i^e .

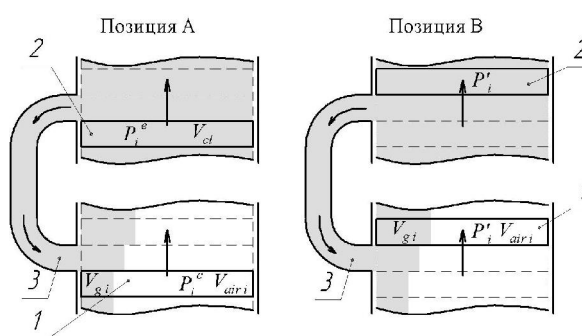


Рис. 2. Расчетная схема процесса каскадного массообмена

1 – ячейка участка сжатия; 2 – ячейка участка расширения; 3 – массообменный канал статора

В результате сообщения ячеек 1 и 2 посредством канала 3 в ячейках 1 и 2 устанавливается общее давление P_i' (поз.В).

Очевидно, что работа расширения газов в ячейке 2 расходуется на сжатие рабочего тела в ячейке 1 $L_e = L_c$.

Тогда, используя известное выражение работы идеального газа в адиабатическом процессе, можно записать:

$$\frac{k_g}{k_g - 1} \cdot P_i^e \cdot V_{cl} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_i'}{P_i^e} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} \right] = P_i^c \left\{ \frac{k_g}{k_g - 1} \cdot V_{gi} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_i'}{P_i^c} \right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}} \right] + \frac{k_{air}}{k_{air} - 1} \cdot V_{airi} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_i'}{P_i^c} \right)^{\frac{k_{air} - 1}{k_{air}}} \right] \right\}$$

где k_g – показатель адиабаты сжимающего газа;

k_{air} – показатель адиабаты сжимаемого воздуха

Составляя аналогичные уравнения для всех пар смежных ячеек каскадного массообмена легко получить приведенную ниже систему:

$$\begin{cases} \frac{k_g}{k_g-1} \cdot P_1^e \cdot \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_1^e} \right)^{\frac{k_g-1}{k_g}} \right] = \frac{k_c}{k_c-1} \cdot P_1^c \cdot \left[\left(\frac{P_1}{P_1^c} \right)^{\frac{k_{air}-1}{k_c}} - 1 \right] \\ \dots \\ \frac{k_g}{k_g-1} \cdot P_i^e \cdot \left[1 - \left(\frac{P_i}{P_i^e} \right)^{\frac{k_g-1}{k_g}} \right] = P_i^c \cdot \left\{ \frac{k_g}{k_g-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_i} \right)^{\frac{1}{k_{air}}} \right] \cdot \left[\left(\frac{P_i}{P_i^c} \right)^{\frac{k_g-1}{k_g}} - 1 \right] + \frac{k_{air}}{k_{air}-1} \cdot \left(\frac{P_a}{P_i} \right)^{\frac{1}{k_c}} \cdot \left[\left(\frac{P_i}{P_i^c} \right)^{\frac{k_{air}-1}{k_c}} - 1 \right] \right\} \\ \dots \\ \frac{k_g}{k_g-1} \cdot P_{Zk}^e \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{Zk}}{P_{Zk}^e} \right)^{\frac{k_g-1}{k_g}} \right] = P_{Zk}^c \cdot \left\{ \frac{k_g}{k_g-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{Zk}} \right)^{\frac{1}{k_{air}}} \right] \cdot \left[\left(\frac{P_{Zk}}{P_{Zk}^c} \right)^{\frac{k_g-1}{k_g}} - 1 \right] + \frac{k_c}{k_c-1} \cdot \left(\frac{P_a}{P_{Zk}} \right)^{\frac{1}{k_c}} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{Zk}}{P_{Zk}^c} \right)^{\frac{k_{air}-1}{k_c}} \right] \right\} \end{cases} \quad (1)$$

где $i=1\dots Z_k$ – номер напорнообменного канала, сообщающего рассматриваемую пару смежных ячеек;

$P_1^c = P_a$ – давление в ячейке в конце процесса наполнения;

$P_1^r = P_r$ – остаточное давление газов в ячейке, в момент, предшествующий сообщению с окном ГНД;

$P_{Zk}^e = P_k$ – давление в ячейке после разобширения ее с окном ВВД;

$P_{Zk}^c = P_c$ – давление в ячейке в момент, предшествующий сообщению ее с окном ГВД (т.н. давление предварительного сжатия);

Решение системы уравнений (1) позволяет определить численное значение P_c .

На первом этапе расчета находятся размеры окон высокого давления и параметры рабочих сред в

сечениях этих окон.

Сечение окна ГВД рассчитывается из условия реализации заданного расхода активной среды. При этом следует иметь ввиду, что в начальный период сообщения ячейки с окном ГВД часть активной среды расходуется на досжатие рабочего тела в ячейке до уровня давления в окне ВВД. Таким образом, контур окна ГВД условно можно разделить на два сегмента, первый из которых охватывает участок досжатия рабочего тела в ячейке, а второй – вытеснение воздуха через окно ВВД к потребителю.

Для определения соответствующих затрат активной среды на досжатие G_I и вытеснение G_{II} (рис. 3.) обратимся к следующим преобразованиям.

Масса активной среды, поступающей в одну ячейку в процессе предварительного подсжатия m_I , определяется выражением:

$$m_I = \frac{V_{cl}}{R_g \cdot T_g} \left[\frac{P_k}{\left(\frac{P_k}{P_g} \right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_k} \right)^{\frac{1}{k_a}} \right) - \frac{P_c}{\left(\frac{P_c}{P_k} \right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_c} \right)^{\frac{1}{k_c}} \right) \right] \quad (2)$$

Масса активной среды, поступающей в ячейку в процессе вытеснения воздушного заряда сжатого воздуха к потребителю, зависит от последовательности разобшения ячейки с окнами высокого давления.

В случае первичного разобшения ячейки с окном ВВД ячейке устанавливается давление, близкое значению P_g , в случае первичного разобшения ячейки с окном ГВД – близкое к значению P_k .

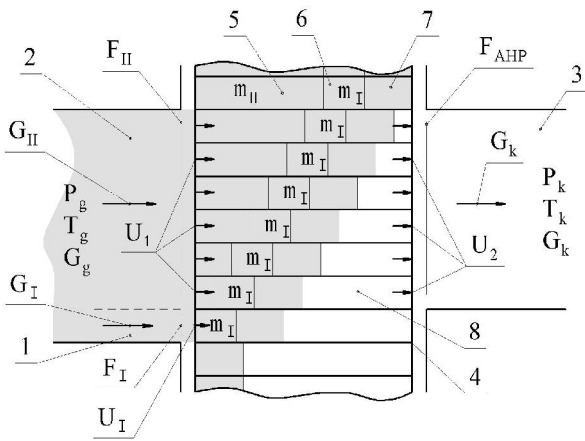


Рис. 3. Расчетная схема процесса досжатия и вытеснения сжатого воздуха в окно ВВД
 1 – сегмент окна ГВД охватывающий участок досжатия рабочего тела в ячейке; 2 – сегмент окна ГВД, охватывающий участок вытеснения воздуха через окно ВВД к потребителю; 3 – окно ВВД; 4 – ротор с ячейками; 5 – сжимающий газ, поступивший в ячейку в процессе вытеснения; 6 – сжимающий газ, поступивший в ячейку в процессе досжатия; 7 – сжимающий газ, поступивший в ячейку в процессе каскадного массообмена; 8 – сжатый воздух

Например, для последнего условия искомая масса m_{II} при рассмотрении идеального цикла КОД может быть представлена в виде:

$$m_{II} = \frac{V_{cl}}{R_g \cdot T_g} \cdot \frac{P_k}{\left(\frac{P_k}{P_g}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(\frac{P_a}{P_k}\right)^{\frac{1}{k_{air}}} \quad (3)$$

Имея ввиду $\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{m_I}{m_{II}}$, а также (2) и (3), получим соотношение:

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{\frac{P_k}{\left(\frac{P_k}{P_g}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_k}\right)^{\frac{1}{k_{air}}}\right)}{\frac{P_k}{\left(\frac{P_k}{P_g}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(\frac{P_a}{P_c}\right)^{\frac{1}{k_{air}}}} = \frac{\frac{P_c}{\left(\frac{P_c}{P_g}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_c}\right)^{\frac{1}{k_{air}}}\right)}{\frac{P_k}{\left(\frac{P_k}{P_g}\right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}} \cdot \left(\frac{P_a}{P_c}\right)^{\frac{1}{k_{air}}}}$$

позволяющее с учетом $G_g = G_I + G_{II}$, определить значения расходов активной среды в первом и втором сегментах окна ГВД.

В рамках инженерного расчета допустимым упрощением является представление средней скорости потока в сегменте 1 следующей зависимостью стационарного истечения:

$$U_I = \sqrt{2 \cdot R_g \cdot T_g \cdot \frac{k_g}{k_g - 1} \left[1 - \left(\frac{P_m}{P_g}\right)\right]}$$

где P_m – среднее давление в ячейке в процессе «досжатия».

Проходное сечение сегмента 1 окна ГВД определяется по формуле:

$$F_I = \frac{G_I}{U_I} \cdot \frac{R_g \cdot T_k \left(\frac{P_m}{P_g} \right)^{\frac{k_g-1}{k_g}}}{P_m}$$

Определение расходов рабочих сред в граничных сечениях ячейки ротора на участке вытеснения сжатого воздуха потребителю базируется на допущении об одномерности течений в сегменте 2 окна ГВД и окна ВВД.

Следует заметить, что с точки зрения оценки кинематических характеристик движения рабочих тел в ячейке на участке стационарного течения с определенной степенью упрощения возможно рассмотрение неоднородных газов в ячейке как однородного.

Отмеченное обуславливает возможность использования известных уравнений, описывающих установившееся движение газа в канале с трением для заданного отношения давлений на входе и выходе в граничных сечениях $\frac{P_g}{P_k}$ [2].

Записанные с помощью известных газодинамических функций $q(x)$, $y(x)$ уравнения неразрывности и движения имеют вид:

$$\frac{P_{01} \cdot F_1 \cdot q(\lambda_1)}{\sqrt{T_{01}}} = \frac{P_2 \cdot F_2 \cdot y(\lambda_2)}{\sqrt{T_{02}}}, \quad (4)$$

$$\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + 2 \cdot \ln(\lambda_1) \right) - \left(\frac{1}{\lambda_2^2} + 2 \cdot \ln(\lambda_2) \right) = \chi, \quad (5)$$

здесь $P_{01} = P_g$ и $P_2 = P_k$, λ_1 и λ_2 – полное давление и коэффициенты скорости соответственно в граничных сечениях ячейки; $F_1 = F_{II}$ – площадь проходного сечения 2-го сегмента окна ГВД; $F_2 = F_{АНР}$ – площадь проходного сечения окна ВВД;

$\chi = \frac{2 \cdot k_g}{k_g + 1} \cdot \xi \frac{L_R}{d_r}$ – приведенная длина канала, где ξ

– коэффициент трения; d_r – приведенный диаметр ячейки; L_R – длина ячейки ротора.

Для адиабатического течения однородного газа в канале постоянного сечения $T_{01} = T_{02}$ и $F_1 = F_2$ уравнение (4) сводится к виду:

$$y(\lambda_2) = \frac{P_{01}}{P_2} \cdot q(\lambda_1) \quad (6)$$

Решением системы уравнений (5) и (6) находят коэффициенты скорости λ_1 и λ_2 в граничных сечениях ячейки.

Таким образом, абсолютные скорости рабочих сред в сегменте 2 окна ГВД и окна ВВД определяются по формулам:

$$U_1 = \lambda_1 \sqrt{\frac{k_g}{k_g - 1} R_g T_g} \quad \text{и}$$

$$U_2 = \lambda_2 \sqrt{\frac{k_g}{k_g - 1} R_g T_g}$$

Площадь проходного сечения 2-го сегмента окна ГВД:

$$F_{II} = \frac{G_{II} \cdot R_g \cdot T_g}{U_1 \cdot P_g}$$

Минимальный угловой размер 2-го сегмента окна ГВД определяется условием размещения в створке окна не меньше 3...4 ячеек ротора (одновременного подключения к его створкам не меньше 3...4 ячеек ротора) с целью минимизации зоны перемешивания сжимающей и сжимаемой сред.

В свою очередь угол раскрытия окна ВВД $\phi_{АНР}$ примерно соответствует значению ϕ_{II} ввиду целесообразности исключения обратных течений

рабочей среды в выходных сечениях ячеек в зоне их взаимодействия с окнами высокого давления. Таким образом:

$$F_{АНР} \approx F_{II}.$$

Производительность КОД может быть найдена по формуле:

$$G_k = U_2 \cdot \frac{P_k}{R_{air} \cdot T_k} \cdot F_{АНР} \cdot (1 - \Theta),$$

где Θ – относительная степень загромождения окна радиальными перемычками между ячеек.

Геометрические размеры ротора выбираются из условия равенства расхода воздуха в окне ВВД с массовой пропускной способностью ротора с учетом связи углового размера окна ВВД $\varphi_{АНР}$, длиной ротора L_R и частотой его вращения n_R

$$L_R = \varphi_{АНР}^2 \cdot \frac{G_k \cdot R_{air} \cdot T_a}{2160 \cdot n_R \cdot P_a \cdot F_{АНР} \cdot (1 - \Theta)}$$

Доводочные испытания опытных установок КОД подтвердили расчетные показатели работы по параметрам напорности и производительности в диапазоне частот вращения ротор от 1500 до 3500 мин⁻¹.

Список литературы:

1. Крайнюк А.И., Сторчеус Ю.В. Системы газодинамического наддува. Монография. – Луганск: Изд-во Восточноукр.гос.ун-та, 2000. – 224с.
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.:Наука, 1969. – 824с.