

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПОЛНЕНИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИВодОВ ИМПУЛЬСНЫХ МАШИН

Целью проведенного теоретического исследования является совершенствование методики расчета процесса наполнения камеры сгорания (КС) машин импульсной резки (МИР) компонентами энергоносителя (смесью природного газа с воздухом) и получение более достоверных величин параметров, характеризующих этот процесс, таких как давление $P_{к.сг}$, температура $T_{к.сг}$ в КС, время наполнения $\tau_{нап}$. Для случая, когда теплообмен в КС отсутствует, эта задача решена в работе [1]. Сходимость расчетных и экспериментальных значений давления смеси в КС и времени наполнения удовлетворительна, хотя и требует уточнения, чего нельзя утверждать относительно температуры. Следуя методике расчета, приведенной в работе [1], температура смеси в процессе наполнения непрерывно повышается, стремясь к величине $T_{рес} \cdot k$ ($T_{рес}$ – температура в ресивере, k – показатель адиабаты). Однако в действительности температура смеси значительно ниже. Точное определение величины $T_{к.сг}$ особенно к концу наполнения имеет исключительно важное значение, поскольку от этого зависит степень достоверности расчета величины эффективной энергии цикла и необходимая количественная дозировка смеси для технологического процесса. Без учета теплообмена в КС невозможно получить такую функцию, которая бы описывала реальный процесс изменения температуры во время наполнения. Теплообмен можно учесть, определяя коэффициент теплоотдачи $\alpha_{мен}$ как величину, зависящую от скорости движения газа относительно стенок камеры.

Значение коэффициента расхода μ , найденное по справочным данным, приводит к значительной погрешности расчета, поскольку не учитывает особенностей системы подачи газа и воздуха в КС, включающей в себя клапаны и трубопроводы. Таким образом, для математического описания процесса наполнения необходимо определение двух важных коэффициентов $\alpha_{мен}$ и μ .

Расчетная схема представляет собой ёмкость-ресивер и КС, соединённые между собой трубопроводом. Математическое описание процесса выполним при следующих допущениях: газовая среда идеальна; теплоёмкость газа постоянна; температура стенок ресивера и камеры в процессе наполнения газом также постоянна; влияние трубопровода и установленных в нём клапанов на расход газа будем учитывать коэффициентом расхода μ . Наполнение КС состоит из двух

аналогичных процессов: наполнение горючим газом, а затем воздухом до заданных давлений.

Рассмотрим практический вариант, когда объём ресивера во много раз (более чем в десять) превышает объём КС. Начальная температура газа в таком ресивере T_{pec} близка к температуре его стенок и в течение процесса наполнения существенно не меняется, а если при этом конечное давление газа в КС значительно меньше давления в ресивере P_{pec} , то и давление, и температуру в ресивере во время наполнения можно считать постоянными.

Для определения математической модели процесса наполнения КС импульсных машин используем закономерности термодинамики тела переменной массы [1, 2]. Полученные путём математических преобразований уравнения, содержат множество параметров, а это усложняет их использование при расчетах. Задача существенно упрощается, а число независимых величин уменьшается, если систему дифференциальных уравнений записать в безразмерном виде:

$$\frac{d\bar{P}_{к.с2}}{d\tau} = k \cdot \omega - \frac{k-1}{\sqrt{k}} \cdot A \cdot (\bar{T}_{к.с2} - \Theta), \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{T}_{к.с2}}{d\tau} = \frac{n-1}{n} \cdot \frac{\bar{T}_{к.с2}}{\bar{P}_{к.с2}} \left[k \cdot \omega - \frac{k-1}{\sqrt{k}} \cdot A \cdot (\bar{T}_{к.с2} - \Theta) \right], \quad (2)$$

$$n = k + k \cdot \left(\frac{1}{\bar{T}_к} - 1 \right) - \frac{k-1}{\sqrt{k}} \cdot \left(1 - \frac{\Theta}{\bar{T}_{к.с2}} \right) \cdot \frac{A}{\omega}, \quad (3)$$

$\bar{P}_{к.с2} = P_{к.с2} / P_{pec}$ и $\bar{T}_{к.с2} = T_{к.с2} / T_{pec}$ – давление и температура в КС в безразмерном виде; $\Theta = T_{к.к.с2} / T_{pec}$, $T_{к.к.с2}$ – температура корпуса камеры; n – показатель термодинамического процесса; $\tau = \tau_{нап} / \tau_{м-б}$ – время наполнения полости камеры в безразмерном виде; $\tau_{нап}$ – текущее значение времени наполнения в с, $\tau_{м-б}$ масштаб времени, в качестве которого примем величину, объединяющую

следующие параметры: $\tau_{м-б} = \frac{V_{к.с2}}{\mu f_{mp} \sqrt{k \cdot R \cdot T_{pec}}}$, где R – газовая

постоянная; f_{mp} – площадь сечения впускного трубопровода.

Так как скорость звука в газовой среде с начальной температурой T_{pec} равна $\sqrt{k \cdot R \cdot T_{pec}}$, то можно заключить, что $\tau_{м-б}$ – это время, за которое звук распространится в газе на расстояние равное $V_{к.с2} / \mu f_{mp}$.

Величина ω зависит от перепада давлений между ресивером и камерой сгорания. При надкритическом перепаде, когда $P_{к.с2} \leq v$,

$$\omega = \beta^{\frac{k+1}{2k}}, \text{ где } \beta = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

При подкритическом, когда $\bar{P}_{к.сг} > \beta$,

$$\omega = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\bar{P}_{к.сг}^{\frac{2}{k}} - \bar{P}_{к.сг}^{\frac{k+1}{k}} \right]}.$$

Уравнения (1,2,3), имеющие безразмерный вид, описывают подобные явления. Известно что, для группы подобных процессов коэффициенты и свободные члены уравнений должны иметь численно одинаковые значения. Исходя из этого, критериями подобия процесса наполнения можно считать Θ , A и k . Критерий Θ определяет температуру корпуса камеры. Показатель k зависит от природы газа (для природного газа $k = 1,28$, для воздуха 1,4, для пропан-бутана $k = 1,12$).

Критерий подобия A объединяет параметры, от которых зависит теплообмен в КС во время наполнения, и описывается выражением

$$B = \frac{\alpha_{мен} \cdot f_{к.сг}}{\mu \cdot f_{тп} \cdot C_{рес}} \cdot \sqrt{\frac{\Phi_{рес}}{R}},$$

здесь $f_{к.сг}$ – площадь внутренней поверхности КС.

Для решения уравнений (1,2,3) необходимо знать величину коэффициентов расхода μ и теплоотдачи $\alpha_{мен}$. Они вычисляются на основе экспериментальных данных. Для этого измеряют давление и температуру газа в камере во время её наполнения и таким образом устанавливают законы изменения давления и температуры по времени,

затем, используя эти кривые для определения $\frac{dP_{к.сг}}{d\tau_{нап}}$ и $\frac{dT_{к.сг}}{d\tau_{нап}}$ и решая

в общем виде (т.е. до преобразования в безразмерные) дифференциальные уравнения относительно μ и $\alpha_{мен}$, получают их численные значения.

В зависимости от относительного диаметра впускного клапана $\bar{d}_{кл}$, т.е. от отношения его диаметра к диаметру подводящего трубопровода, величина μ изменяется от 0,75 до 0,4 (чем больше $\bar{d}_{кл}$, тем меньше μ). Для МИР коэффициент расхода μ равен 0,4.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{мен_0}$ на начальном этапе впуска газа величина постоянная. Согласно расчетам с учетом экспериментальных данных для машин МИР $\alpha_{мен_0}$ находится в пределах 150...200 Дж/(м²·с·К). Далее величина $\alpha_{мен_0}$ непрерывно изменяется в процессе наполнения,

являясь функцией критерия Рейнольдса, Re . Число Re зависит от скорости истечения газа v через впускной клапан.

$$v = v_{кр} \cdot \gamma^c, \quad (4)$$

где $v_{кр}$ – критическая скорость истечения газа при критическом давлении $\bar{P}_{к.сг} = \beta$, β зависит только от рода газа. При надкритическом перепаде давлений $\bar{P}_{к.сг} \leq \beta$, и $\gamma = 1$.

При подкритическом перепаде, когда $\bar{P}_{к.сг} > \beta$,

$$\gamma = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - \bar{P}_{к.сг}^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

На этом этапе скорость наполнения КС снижается и величина коэффициента $\alpha_{мен}$ уменьшается.

Аналогичную уравнению (4) зависимость, можно использовать для расчета $\alpha_{мен}$. $\alpha_{мен} = \alpha_{мен_0} \cdot \gamma^c$. (5)

Согласно экспериментальным данным коэффициент теплоотдачи более всего зависит от давления в ресивере, при увеличении $P_{рес}$ от 0,6 до 2,6 МПа $\alpha_{мен}$ повышается в 2 раза, из этого следует, что величина показателя c в зависимости (5) равна 0,5, а коэффициент $\alpha_{мен}$ пропорционален \sqrt{Re} .

Сравнение полученных расчетных кривых $P_{к.сг}(\tau_{нап})$ и $T_{к.сг}(\tau_{нап})$ с аналогичными экспериментальными кривыми показывает их удовлетворительную сходимость. Температура смеси в камере сгорания привода на стадии окончания наполнения находится в диапазоне от 30⁰С до 80⁰С и больше всего зависит от температуры воздуха в ресивере, температуры стенок камеры сгорания и времени наполнения её полости компонентами смеси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вопросы термодинамики тела переменной массы / М. А. Мамонтов. – М.: Оборонгиз, 1961. – 55 с.
2. Исследование процесса наполнения камеры сгорания приводов импульсных машин для обработки металлов давлением: отчёт о НИР / Харьк. авиац. ин-т. – № ГР 01850025147; Инв. № 02860082702. – Х., 1986. – 75 с.