

УДК 621.43.068

В.Ю. БАРАНОВ, канд. техн. наук; доц. Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Луганск

Р.Н. АСТАШОВ, аспирант Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Луганск

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА КОНВЕРСИИ МЕТАНОЛА

В статье рассмотрена методика расчета термохимического реактора конверсии метанола: расчет параметров греющего теплоносителя (отработавших газов) и количества катализатора; определение размера реактора и коэффициента теплоотдачи в межтрубном пространстве.

У статті розглянута методика розрахунку термохімічного реактора конверсії метанолу: розрахунок параметрів грійючого теплоносія (відпрацьованих газів) і кількості каталізатора; визначення розміру реактора і коефіцієнта тепловіддачі в міжтрубному просторі.

This article is about the method used to calculate thermochemical conversions in methanol reactor: the calculation of the heated thermal medium (exhausted gases) and the amount of catalyst, determination of reactor's size and thermal efficiency (heat emission) of intertubular space.

Применение метанола в качестве основного топлива и добавки к бензину, подтвердило эффективность его влияния на рабочий процесс двигателей. Однако при этом были выявлены такие недостатки метанола, как: трудность запуска холодного двигателя, образование паровых пробок в системе питания при повышенных температурах, сложность получения однородной смеси по цилиндрам, повышенный износ двигателя и уменьшение срока службы масла.

Преодолеть вышеназванные недостатки позволяет способ получения водородсодержащего газа путем конверсии метанола на борту автомобиля с утилизацией теплоты отработавших газов (ОГ) [1, 2].

Наличие в топливе водорода (12,5 % по массе) обеспечивает возможность работы двигателя при обеднении смеси до значений коэффициента избытка воздуха $\alpha = 7,6$ [3]. Ограничение обеднения смеси с целью сохранения полноты сгорания, повышения температуры ОГ целесообразно на уровне $\alpha = 2$, что более чем на порядок снижает выбросы оксидов азота.

Теплоемкость C_p , кДж/(м³·К) компонентов ОГ при температуре t_{OG} находится по таблицам [4]. Объем греющего теплоносителя для тепловых расчетов относят к нормальным условиям

$$V_{н.у} = V_{OG} \frac{P_{OG} \cdot 273}{P_0(273 + t_{OG})}, \quad (1)$$

где t_{OG} – температура ОГ на входе в реактор при работе двигателя на максимальной мощности, К.

Плотность ОГ, кг/м³

$$\rho = \frac{G_{OG}}{V_{н.у}}. \quad (2)$$

Значение средней теплоемкости ОГ определяется по формуле, кДж/(м³·К)

$$C_p^{OG} = \sum C_{p_i} X_i, \quad (3)$$

где X_i – объемные доли компонентов.

Объем катализатора, обеспечивающий требуемый расход продуктов конверсии метанола (ПКМ) $G_{кг}$, л

$$V_K = \frac{1000 f G_{кг} P_0}{\rho_{кг} W P_p}, \quad (4)$$

где $\rho_{кг}$ – плотность ПКМ, кг/м³;
 W – объемная скорость по продуктам конверсии, ч⁻¹;
 P_p – расчетное давление в реакторе конверсии, МПа;
 f – коэффициент, учитывающий вид катализатора [5].

Размеры реактора оцениваются исходя из условия выбора кожухотрубной конструкции реактора.

Если ограничиться длиной катализаторных трубок l (м), определяемой размерами подкапотного пространства автомобиля, то для размещения катализатора понадобится трубок, шт

$$n = \frac{V_K}{\frac{\pi d_{вн}^2 l}{4}}, \quad (5)$$

где $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубок, мм.

Компоновка труб существенно влияет на характер движения теплоносителя и теплоотдачу. При прочих равных условиях теплоотдача в шахматных пучках протекает интенсивнее, чем в коридорных [6].

Катализаторные трубки могут быть вписаны в корпус реактора с площадью поверхности:

$$F_K = 2B \cdot T + 2B \cdot L + 2T \cdot L, \quad (6)$$

где L – длина реактора, м;
 B – ширина реактора, м;
 T – высота реактора, м.

Шаг трубок в пучке принимается [6]:

– по горизонтали $S_1 = 1,3 \cdot d_{нар}$, мм,

– по вертикали $S_2 = S_1/2$, мм.

Приведенный диаметр корпуса реактора, м

$$D_K = \sqrt{\frac{4B \cdot T}{\pi}}. \quad (7)$$

Коэффициент теплоотдачи в трубном пространстве определяется по формуле [6]:

$$\alpha_{ТР} = 0,813 f \frac{\lambda}{d_{вн}} e^{-6 \left(\frac{d_3}{d_{вн}} \right)} \left(\frac{d_3 G_f}{\eta} \right)^{0,9} \left(\frac{Pr}{0,76} \right)^{0,4}, \quad (8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубок, заполненных катализатором, мм;
 d_3 – средний диаметр зерен катализатора, мм;

$$Pr = \frac{1000C_p\eta}{\lambda} \text{ – число Прандтля;}$$

η – вязкость газа, Па·с;

G_f – расход ПКМ через 1 м² сечения трубок;

f – коэффициент, зависящий от вида катализатора.

Определяем коэффициент теплопроводности продуктов конверсии метанола по формуле

$$\lambda_{см} = \frac{\sum X_i \lambda_i \sqrt[3]{\mu_i}}{\sum X_i \sqrt[3]{\mu_i}}, \quad (9)$$

где μ_i – молекулярная масса компонентов конвертированного топлива;

λ_i – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Значения этих величин представлены в таблицах [4].

Коэффициент теплопроводности для средней температуры ПКМ, К

$$T_{cp} = \frac{T_{кат}^{min} + T_{кат}^{max}}{2}, \quad (10)$$

определяем по формуле Сутерленда

$$\lambda_T = \lambda_0 \frac{273 + C}{T_{cp} + C} \left(\frac{T_{cp}}{C} \right)^{3/2}, \quad (11)$$

где λ_0 – теплопроводность при нормальных условиях, Вт/(м·К);

C – безразмерный коэффициент, зависящий от рода газа (для H₂C = 89; для СО-С = 1...2).

Теплопроводность газов возрастает с повышением температуры и слабо зависит от давления при росте последнего вплоть до 10 МПа [7].

Диаметр зерна катализатора определяем по формуле:

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6V_K}{\pi}}. \quad (12)$$

Вязкость ПКМ определяем по формуле

$$\eta_{см} = \frac{\mu_{см}}{\sum \frac{X_i \mu_i}{\eta_i}}, \quad (13)$$

где $\mu_{см}$ – мольная масса смеси компонентов, кг/моль;

η_i – вязкость компонентов газа;

μ_i – мольные массы компонентов газа, кг/моль.

Вязкость газов увеличивается с повышением температуры.

Зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры выражают эмпирическим уравнением Сутерленда

$$\eta_t = \eta_0 \frac{273 + C}{T_{cp} + C} \left(\frac{T_{cp}}{C} \right)^{3/2}, \quad (14)$$

где η_0 – коэффициент динамической вязкости при нормальных условиях.

Т.к. влияние давления на вязкость газов уменьшается с повышением температуры [7], то вязкость водорода и оксида углерода принимается только с учетом повышения температуры.

Число Прандтля для ПКМ

$$Pr = \frac{1000C_p^{кг} \eta_{см}}{\lambda_{см}}, \quad (15)$$

где $C_p^{кг}$ – теплоемкость ПКМ для полной конверсии метанола при соотношении $H_2:CO = 2:1$, кДж/(кг·К).

Массовая теплоемкость ПКМ при постоянном давлении, кДж/(кг·К)

$$C_p^{кг} = C_p^{H_2} \omega_{H_2} + C_p^{CO} \omega_{CO}, \quad (16)$$

где ω_{H_2} , ω_{CO} – весовые доли компонентов ПКМ, равные

$$\omega_{H_2} = \frac{r_{H_2} \mu_{H_2}}{\mu_{кг}}, \quad \omega_{CO} = \frac{r_{CO} \mu_{CO}}{\mu_{кг}}.$$

Весовой расход ПКМ, приходящийся на 1 м^2 проходного сечения реактора, кг/(с·м²)

$$G_F = \frac{G_{кг}}{\frac{\pi d_{вн}^2}{4} n \cdot 3600}, \quad (17)$$

где n – число трубок в пучке.

Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве определяется по формуле [6]

$$\alpha_{MT} = 2,02 \left(\frac{W \lambda_{см}}{l d_3 \cdot 3600} \right)^{1/3}, \quad (18)$$

де W – весовой расход теплоносителя в реакторе, кг/(с·м²);

$\lambda_{см}$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

l – длина трубок, м;

d_3 – эквивалентный диаметр, м

$$d_3 = \frac{D_K^2 - n d_{нар}^2}{n d_{нар}}. \quad (19)$$

Теплоносителем являются отработавшие газы двигателя [8].

Вязкость ОГ определяем по формуле

$$\eta_{ог} = \frac{\mu_{ог}}{\sum \frac{X_i \mu_i}{\eta_i}}. \quad (20)$$

Теплопроводность ОГ определяем по формуле

$$\lambda_{ог} = \frac{\sum X_i \lambda_i \sqrt[3]{\mu_i}}{\sum X_i \sqrt[3]{\mu_i}}, \quad (21)$$

где μ_i – молекулярная масса компонентов ОГ.

По формуле Сутерленда определяем вязкость и теплопроводность компонентов ОГ:

$$\eta_i = \eta_{0i} \frac{273 + C}{T_{\text{ОГ}} + C} \left(\frac{T_{\text{ОГ}}}{C} \right)^{3/2}; \quad (22)$$

$$\lambda_i = \lambda_{0i} \frac{273 + C}{T_{\text{ОГ}} + C} \left(\frac{T_{\text{ОГ}}}{C} \right)^{3/2}. \quad (23)$$

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{ТР}}} + \frac{\sigma_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}}}, \quad (24)$$

где $\sigma_{\text{СТ}}$ – толщина стенки трубки, м;

$\alpha_{\text{ТР}}$ – коэффициент теплопроводности в трубном пространстве, Вт/(м·К);

$\lambda_{\text{СТ}}$ – коэффициент теплопроводности для стали, Вт/(м·К).

Выводы:

1 Благодаря предложенной методике расчета термохимического реактора конверсии метанола можно рассчитать основные параметры реактора и определить пути дальнейших исследований по совершенствованию процесса теплообмена и конструкции последнего.

2 Т.к. исследования подтверждают эффективность использования ПКМ в качестве топлива для улучшения топливной экономичности, то предложенная методика расчета поможет в дальнейшем создавать эффективные конструкции теплообменных аппаратов.

Список литературы: 1. Исследование и совершенствование рабочего процесса поршневого ДВС при частичной конверсии топлива: отчет по НИР / Ворошиловградский машиностроительный институт; рук. В.А. Звонов; исполн. В.К. Балакин, В.И. Черных, В.Ю. Баранов. – Ворошиловград, 1988. – № ГР 01880007586. – Инв. № 02.8900219916 2. *Саби́ров, Ж.М.* Газификация и конверсия автомобильных топлив [Текст] / Ж.М. Саби́ров. – Ташкент: Фан, 1984. – 96 с. 3. *Inagaki, T.* Combustion and emission of gaseous fuel from reformed methanol in automotive engine [Text] / T. Inagaki, T. Hirota, Z. Ueno // Proceedings of the Alcohol Fuels Technology 3-rd International Symposium, Asilomar CA. – 1979. 4. *Иссерлин, А.С.* Основы сжигания газового топлива [Текст] / А.С. Иссерлин. – Л.: Недра, 1987. – 336 с. 5. *Siminieeanu, J.* Modelarea reactorului de reformare primara a metanolului [Text] / J. Siminieeanu, C. Calistru // Met. Sec. sti. Acad. RSR. – 1980. – Т. 43, № 1. – Р. 219-250. 6. *Бажан, П.И.* Справочник по теплообменным аппаратам [Текст] / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 365 с. 7. *Дубовкин, Н.Ф.* Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания [Текст] / Н.Ф. Дубовкин. – М.-Л. Госэнергоиздат, 1962. – 288 с. 8. *Шатров, Е.В.* Рабочий процесс гидридного аккумулятора водорода при использовании тепла отработавших газов двигателя [Текст] / Е.В. Шатров, В.М. Кузнецов и др. // Автомобильная промышленность. – 1982. – № 4. – С. 5.

© Баранов В.Ю., Асташов Р.Н., 2012
Поступила в редколлегию 15.02.12