

работы дозирующих модулей, и стабильность расходных характеристик цикла всех дозирующих модулей.

В [4] приведен подробный анализ структуры и алгоритмов работы модульных дозирующих систем.

Модульные дозирующие системы различных вариантов исполнения позволяют реализовать многомоторный гидравлический привод ходового и рабочего оборудования мобильных строительных, дорожных и сельскохозяйственных машин. Построение структуры модульных дозирующих систем обеспечивает:

- независимость работы контуров потребителей при дискретно синхронном расходе рабочей жидкости по напорным магистралям потребителей;
- возможность модульного изменения числа контуров потребителей в соответствии с потребностями реализуемого гидропривода;
- возможность дискретно синхронной подачи рабочей жидкости в напорные магистрали ряда контуров потребителей модульной дозирующей системы и одновременного слива рабочей жидкости из напорных магистралей остальных потребителей, а также возможность выключения контуров потребителей;
- возможность ступенчатого регулирования

расхода рабочей жидкости между контурами потребителей.

## ВЫВОД

Многопоточные насосные установки и модульные дозирующие системы позволят формировать гидравлический многомоторный привод ходового и технологического оборудования машин, максимально уменьшая удельный вес механических передач в кинематической цепи, полностью используя преимущества объемного гидравлического привода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дорожно-строительные машины: Учеб. для специальности «Строительство дорог и транспортных объектов» вузов / А. В. Вавилов, И. И. Леонович, А. Н. Максименко, Л. С. Шкрадюк, А. М. Щемелев; Под общ. ред. А. М. Щемелева. – Мн.: УП «Технопринт», 2000. – 515 с.
2. Петров В. А. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 248 с.
3. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Объемные гидро- и пневмомашин и передачи: Учеб. пособие для вузов / А. Ф. Андреев, Л. В. Барташевич, Н. В. Богдан и др.; Под ред. В. В. Гуськова. – Мн.: Вышэйш. шк., 1987. – 310 с.
4. Котлобай А. Я., Котлобай А. А., Маров Д. В. К вопросу о формировании структуры модульных дозирующих систем гидравлических объемных приводов технологических машин. Рук. деп. ВИНТИ. – 09.01.04. – 2004. – № 33. – 56 с.

УДК 621.1.0.18

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ПРИ НАГРЕВЕ ТОНКИХ ТЕЛ КОНВЕКЦИЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЕМ

Докт. техн. наук, проф. КОВАЛЕВСКИЙ В. Б., инженеры РОМАНОВ А. В., ПРОНЬ В. А.

Белорусский национальный технический университет

Определить величину расхода топлива, необходимую для поддержания требуемого температурного режима в печи, можно на основе уравнения теплового баланса [1].

Предлагаемая методика позволяет получить уравнения для расчета мгновенного расхода топлива в любой момент времени. В отличие от подхода, описанного в [1], данный способ решения этой задачи учитывает не начальную и конечную температуры металла, а распределение температуры в текущий момент времени, что существенно повышает точность расчетов. Результаты апробации методики представлены в [2].

Рассмотрим данную задачу на примере нагрева термически тонких заготовок круглого сечения при теплообмене на поверхности путем конвекции и излучения.

Согласно принятым допущениям процесс нагрева заготовки описывается следующим образом:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha(T_{\text{пч}} - T) + \sigma(T_{\text{пч}}^4 - T^4); \quad (1)$$

$$T(0) = T_0, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – коэффициент теплообмена излучением;  $\alpha$  – то же конвекцией;  $T_{\text{пч}}$  и  $T$  – температура

среды и металла в момент времени  $t$  соответственно;  $T_0$  – начальная температура заготовки.

Пусть также известно распределение температуры печи в течение всего периода нагрева. Тогда средняя по объему температура металла определяется по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{V} T(t), \quad (3)$$

где  $V$  – объем нагреваемой заготовки.

Необходимо получить уравнение для расхода топлива в момент времени  $0 \leq t \leq t_k$ , где  $t_k$  – время окончания процесса нагрева.

Зафиксируем момент времени  $t$  и интервал  $\Delta t$ .

Рассмотрим статьи расхода теплоты, необходимые для составления уравнения теплового баланса [1].

1. Расход теплоты на нагрев металла с  $T_{\text{ср}}(t)$  до  $T_{\text{ср}}(t + \Delta t)$  (полезная теплота)

$$Q_{\text{пол}}(t) = P c_m (T_{\text{ср}}(t + \Delta t) - T_{\text{ср}}(t)), \quad (4)$$

где  $P$  – производительность печи, кг/ч;  $c_m$  – средняя удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·К).

2. Расход теплоты с дымовыми газами, покидающими печь (для топливных печей):

$$Q_{\text{yx}}(t) = B(t) V_d c_d T_{\text{yx}} \Delta t, \quad (5)$$

где  $B(t)$  – расход топлива, м<sup>3</sup>/ч;  $V_d$  – объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 м<sup>3</sup> топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_d$  – удельная теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $T_{\text{yx}}$  – температура уходящих дымовых газов, К.

3. Расход теплоты вследствие потерь через футеровку (кладку) печи

$$Q_{\text{кл}}(t) = \frac{T_{\text{пч}}^4(t)}{S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + 1/\alpha_c} F_{\text{ст}} \Delta t, \quad (6)$$

где  $S_1/\lambda_1$ ,  $S_2/\lambda_2$  – тепловые сопротивления, м<sup>2</sup>·К/Вт;  $\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стен печи окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{\text{ст}}$  – площадь наружной поверхности футеровки печи, м<sup>2</sup>.

4. Расходом теплоты, вызываемым излучением через открытые окна и дверцы печи, пренебрегаем.

5. Расход теплоты на нагрев транспортирующих устройств (поддонов, конвейеров)

$$Q_{\text{тр}}(t) = \frac{M_{\text{тр}}}{\tau} c_{\text{тр}} (T_{\text{тр}}(t + \Delta t) - T_{\text{тр}}(t)), \quad (7)$$

где  $M_{\text{тр}}$  – масса транспортирующих устройств, находящихся в печи, кг;  $c_{\text{тр}}$  – средняя удельная теплоемкость транспортирующих устройств, Дж/(кг·К);  $T_{\text{тр}}(t + \Delta t)$ ,  $T_{\text{тр}}(t)$  – температура транспортирующих устройств;  $\tau$  – время технологического цикла, ч.

Предположим также, что варьирование температуры нагрева транспортирующих устройств соответствует изменению температуры печи, т. е.

$$Q_{\text{тр}}(t) = \frac{M_{\text{тр}}}{\tau} c_{\text{тр}} (T_{\text{пч}}(t + \Delta t) - T_{\text{пч}}(t)). \quad (8)$$

6. Расход теплоты вследствие потерь через металлические стержни и вставки в футеровке печи (анкеры для крепления футеровки из керамического волокна и т. п.), называемые тепловыми короткими замыканиями, определим в виде

$$Q_{\text{т.к.з}}(t) = Q_{\text{кл}}(t). \quad (9)$$

7. Неучтенные потери

$$Q_{\text{неучт}}(t) = 0,1 (Q_{\text{кл}}(t) + Q_{\text{тр}}(t) + Q_{\text{т.к.з}}(t)). \quad (10)$$

Таким образом, суммарный расход теплоты в момент времени  $t$  определяется

$$\sum Q_{\text{расх}}(t) = Q_{\text{пол}}(t) + Q_{\text{yx}}(t) + Q_{\text{кл}}(t) + Q_{\text{т.к.з}}(t) + Q_{\text{тр}}(t) + Q_{\text{неучт}}(t). \quad (11)$$

Приход теплоты состоит из следующих статей:

1) от сжигания топлива (теплота химических реакций горения)

$$Q_{\text{х.т}}(t) = B(t) Q_{\text{н}}^p \Delta t, \quad (12)$$

где  $B(t)$  – расход топлива, м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{\text{н}}^p$  – низшая теплота сгорания топлива, Дж/м<sup>3</sup>;

2) при подогреве воздуха (физическая теплота воздуха)

$$Q_{\text{ф.в}}(t) = B(t) V_{\text{в}} c_{\text{в}} T_{\text{в}} \Delta t, \quad (13)$$

где  $V_{\text{в}}$  – объем воздуха, необходимый для сжигания 1 м<sup>3</sup> топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{в}}$  – средняя удельная теплоемкость воздуха, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $T_{\text{в}}$  – температура подогрева воздуха, К.

3) при подогреве топлива (физическая теплота топлива)

$$Q_{\text{ф.т}}(t) = B(t) c_{\text{т}} T_{\text{т}} \Delta t, \quad (14)$$

где  $c_t$  – средняя удельная теплоемкость топлива, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $T_t$  – температура подогрева топлива, К.

Приходом теплоты вследствие экзотермических реакций окисления металла пренебрегаем.

Суммарный приход теплоты в момент времени находим по формуле

$$\sum Q_{\text{прих}}(t) = Q_{\text{х.т}}(t) + Q_{\text{ф.в}}(t) + Q_{\text{ф.т}}(t). \quad (15)$$

В соответствии с законом сохранения энергии суммарный расход теплоты должен компенсироваться суммарным приходом. Поэтому уравнение теплового баланса имеет вид

$$\sum Q_{\text{расх}}(t) = \sum Q_{\text{прих}}(t). \quad (16)$$

Подставляя (11) и (15) в (16) и учитывая (3)...(10), (12)...(14), соотношение (16) перепишем в виде

$$Pc_m \frac{T_{\text{ср}}(t + \Delta t) - T_{\text{ср}}(t)}{\Delta t} + B(t) V_d c_d T_{\text{ух}} + \frac{T_{\text{пч}}^4(t)}{S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + 1/\alpha_c} F_{\text{ст}} + 1,1 \frac{M_{\text{тр}}}{\tau \Delta t} c_{\text{тр}} \times \\ \times (T_{\text{тр}}(t + \Delta t) - T_{\text{тр}}(t)) = B(t) Q_{\text{н}}^p + B(t) V_b c_b T_b + B(t) c_t T_t.$$

В последнем соотношении перейдем к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ . Учитывая справедливость соотношений:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{T_{\text{пч}}(t + \Delta t) - T_{\text{пч}}(t)}{\Delta t} = \frac{dT_{\text{пч}}}{dt};$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = \frac{dT}{dt} = \alpha(T_{\text{пч}} - T) + \sigma(T_{\text{пч}}^4 - T^4),$$

в конечном итоге получим

$$\frac{dT_{\text{пч}}}{dt} = A_1 B(t) + A_2 T^4(t) + A_3 T_{\text{пч}}^4(t) + A_4 T(t) + A_5 T_{\text{пч}}(t), \quad (17)$$

где

$$A_1 = \frac{(Q_{\text{н}}^p + V_b c_b T_b + c_t T_t - V_d c_d T_{\text{ух}}) \tau}{1,1 M_{\text{тр}} c_{\text{тр}}};$$

$$A_2 = \frac{Pc_m \sigma \tau}{1,1 M_{\text{тр}} c_{\text{тр}} V};$$

$$A_3 = -\frac{Pc_m \sigma \tau}{1,1 M_{\text{тр}} c_{\text{тр}} V} - \frac{2,2 F_{\text{ст}} \tau}{1,1 M_{\text{тр}} c_{\text{тр}} (S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + 1/\alpha_c)};$$

$$A_4 = \frac{Pc_m \alpha \tau}{1,1 M_{\text{тр}} c_{\text{тр}} V};$$

$$A_5 = -\frac{Pc_m \alpha \tau}{1,1 M_{\text{тр}} c_{\text{тр}} V}.$$

Рассчитываем коэффициенты  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  в уравнении (17). Получаем:

$$A_1 = 1805,26; \quad A_2 = 1,29 \cdot 10^{-11}; \quad A_3 = -1,3 \cdot 10^{-11};$$

$$A_4 = 1,2 \cdot 10^{-4}, \quad A_5 = -1,2 \cdot 10^{-4}.$$

Результаты моделирования на ЭВМ уравнений (1), (2), (17) приведены на рис. 1 и 2.

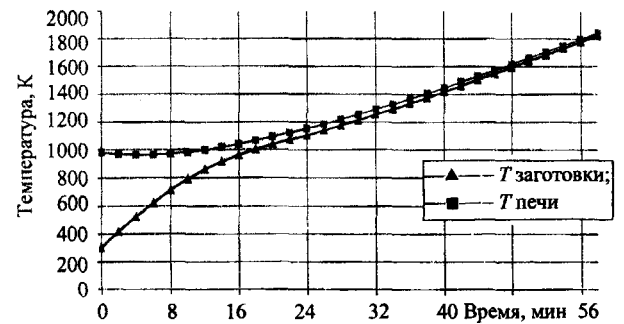


Рис. 1. График изменения температур металла (заготовки) и печи

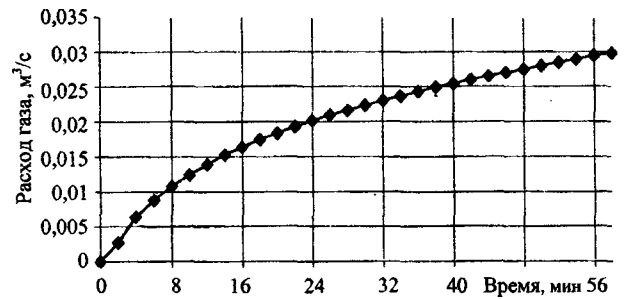


Рис. 2. График расхода топлива за период нагрева заготовки

## ВЫВОД

На основе анализа теплового баланса получено уравнение, позволяющее прогнозировать изменение температуры рабочего пространства печи в зависимости от подачи количества газа на горелочные устройства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский, И. А. Труслова, А. Б. Стеблов, И. А. Павлюченков. – Мн.: Вышэйш. шк., 1992. – 214 с.
2. Ковалевский В. Б., Папкович В. Н., Козлов С. М. // ИФЖ. – 1996. – Т. 69, № 2. – С. 285–290.