

## АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА НА ЭЦВМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С ВНУТРЕННИМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

П. А. АНДРИЯНОВ, А. Ф. ФЕДОРОВ

(Представлена научной итоговой конференцией химико-технологического факультета)

Теплообменники с внутренним источником тепла (электронагреватели, ядерные реакторы, химические реакторы, в которых реакция происходит внутри твердой фазы) по динамическим свойствам можно объединить с группой теплообменников с постоянным по длине тепловым потоком, не зависящим от температуры нагреваемого теплоносителя (пароперегреватели и др.), исходное уравнение которых имеет одинаковый вид [1].

$$T_{12}T_{21}v \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial \tau \partial x} + T_{12}v \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial x} + T_{12}T_{21} \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial \tau^2} + (T_{12} + T_{21}) \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \kappa_2 q(\tau). \quad (1)$$

Вопросами исследования переходных режимов теплообменников данного типа занимаются энергетики [2—5,7], так как вопросы регулирования температуры перегретого пара особенно остро встали в связи с использованием на тепловых электростанциях оборудования повышенных и сверхвысоких параметров. Затем теплообменники стали изучаться в более широком диапазоне применения (химия, промышленная теплоэнергетика) [1, 6, 8—10].

Исследователи идут двумя путями:

1. Метод переходных характеристик [1—3, 6—10].
2. Метод частотных характеристик [4, 5].

Оба метода имеют свои достоинства и недостатки. В последнее время предпочтение отдается 1-му методу, так как он позволяет исследовать динамику теплообменников на электронных вычислительных машинах [6, 8—10].

В данной статье делается попытка дать общую форму алгоритма для расчета на ЭЦВМ переходных характеристик теплообменников с внутренним источником тепла, с постоянным тепловым потоком при различных формах возмущения.

Из выражения (1) путем применения преобразования Лапласа можно получить передаточную функцию.

$$W(p) = W_c(p) [1 - W_p(p)] + W_p(p), \quad (2)$$

где:

$W_c(p) = \frac{\kappa_2}{p(T_{12}T_{21}p + T_{12} + T_{21})}$  — передаточная функция сосредоточенной модели теплообменника;

$W_p(p) = \exp\left(-\frac{\tau_0}{T_{12}}\right) \exp(-\tau_0 p) \exp\left[\frac{\tau_0}{T_{12}T_{21}\left(p + \frac{1}{T_{21}}\right)}\right]$  — передаточная

функция, учитывающая влияние распределенности, одновременно она является и передаточной функцией по каналу  $t_0 - t_1$ . Применяя обратное преобразование Лапласа к выражению (2) и теорему о свертывании в вещественной области, получим выражение переходной характеристики в общем виде при любом законе возмущения:

1. Со стороны теплового потока. В интервале  $[0, \tau_0]$

$$t_1(l, \tau) = \varphi(\tau). \quad (3)$$

В интервале  $[\tau_0, \infty]$

$$t_1(l, \tau) = \varphi(\tau) - \exp\left(-\frac{\tau_0}{T_{12}}\right) \left\{ \varphi(\tau - \tau_0) + \int_0^{\tau - \tau_0} \varphi(\tau - z - \tau_0) \times \right. \\ \left. \times \exp\left(-\frac{z}{T_{21}}\right) \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\tau_0}{T_{12}T_{21}}\right)^{\kappa+1} z^{\kappa}}{\kappa!(\kappa+1)!} dz \right\}, \quad (4)$$

где

$\varphi(\tau)$  — реакция сосредоточенной модели на возмущение:

а). При скачкообразном возмущении

$$\varphi(\tau) = \frac{\kappa_2 T_{12} T_{21}}{(T_{12} + T_{21})^2} \left[ \exp\left(-\frac{T_{12} + T_{21}}{T_{12} T_{21}} \tau\right) + \frac{T_{12} + T_{21}}{T_{12} T_{21}} \tau - 1 \right] q'; \quad (5)$$

б). При линейном возмущении

$$\varphi(\tau) = \frac{\kappa_2 T_{12}^2 T_{21}^2}{(T_{12} + T_{21})^3} \left[ 1 - \frac{T_{12} + T_{21}}{T_{12} T_{21}} \tau + \frac{(T_{12} + T_{21})^2}{2 T_{12}^2 T_{21}^2} \tau^2 - \right. \\ \left. - \exp\left(-\frac{T_{12} + T_{21}}{T_{12} T_{21}} \tau\right) \right] \frac{q'}{\tau_1}; \quad (6)$$

в). При экспоненциальном возмущении

$$\varphi(\tau) = \frac{\kappa_2 T}{T_{12} + T_{21}} \left\{ 1 + \frac{T_{12} T_{21}}{T(T_{12} + T_{21}) - T_{12} T_{21}} \exp\left(-\frac{T_{12} + T_{21}}{T_{12} T_{21}} \tau\right) - \right. \\ \left. - \left[ \frac{T_{12} T_{21}}{T(T_{12} + T_{21}) - T_{12} T_{21}} + 1 \right] \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right) \right\} q'. \quad (7)$$

2. Со стороны температуры на входе. В интервале  $[0, \tau_0]$

$$t_1(l, \tau) = 0. \quad (8)$$

В интервале  $[\tau_0, \infty]$

$$t_1(l, \tau) = \exp\left(-\frac{\tau_0}{T_{12}}\right) \left\{ \varphi_0(\tau - \tau_0) + \int_0^{\tau - \tau_0} \varphi_0(\tau - z - \tau_0) \times \right. \\ \left. \times \exp\left(-\frac{z}{T_{21}}\right) \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\tau_0}{T_{12} T_{21}}\right)^{\kappa+1} z^{\kappa}}{\kappa!(\kappa+1)!} dz \right\}. \quad (9)$$

Выражение (9) получится из (2), если записать передаточную функцию по каналу  $t_0 - t_1$  в виде  $W(p) = W_c(p) W_p(p)$  при условии, что  $W_c(p) = 1$ . Тогда, по аналогии с предыдущим,  $\varphi_0(\tau - \tau_0)$  и  $\varphi_0(\tau - z - \tau_0)$  — есть реакция сосредоточенной модели ( $W_c(p) = 1$ ) на возмущение по заданному закону, сдвинутая по времени на  $\tau_0$  или  $(z + \tau_0)$  соответственно:

а) при скачкообразном возмущении

$$\varphi_0(\tau) = t_0', \quad (10)$$

б) при линейном возмущении

$$\varphi_0(\tau) = \tau \cdot \frac{t_0'}{\tau_1}, \quad (11)$$

в) при экспоненциальном возмущении

$$\varphi_0(\tau) = t_0' \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right). \quad (12)$$

На рис. 1 приведены кривые переходных процессов, рассчитанные на машине Минск-1 по приведенным алгоритмам.

Выражения (4) и (9) не являются оптимальными с точки зрения использования машинного времени. Для расчета одной точки с требуемой точностью на машине Минск-1 требуется около 1,5 минут. С целью

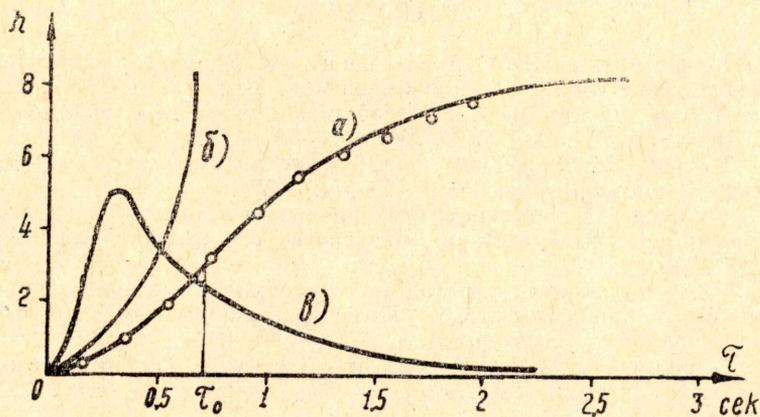


Рис. 1. Переходные характеристики теплообменника.  $\circ$  — экспериментальная [6], ——— расчетная: а) при скачкообразном возмущении; б) при линейном возмущении; в) при экспоненциальном возмущении

уменьшения времени счета интеграл после подстановки значения  $\varphi(\tau - z - \tau_0)$  или  $\varphi_0(\tau - z - \tau_0)$  можно разложить на сумму интегралов, каждый из которых приводится к виду [11]

$$\int z^\kappa \exp az dz = a^{az} \left( \frac{z^\kappa}{a} + \sum_{m=1}^{\kappa} (-1)^m \frac{\kappa(\kappa-1)\dots(\kappa-m+1)}{a^{m+1}} z^{\kappa-m} \right). \quad (13)$$

Например, при скачкообразном возмущении после преобразования будем иметь следующее выражение:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\tau-\tau_0} \varphi(\tau - z - \tau_0) \exp\left(-\frac{z}{T_{21}}\right) \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\tau_0}{T_{12}T_{21}}\right)^{\kappa+1} z^\kappa}{\kappa!(\kappa+1)!} dz = \\ & = \frac{q'\kappa_2 T_{12} T_{21}}{(T_{12} + T_{21})^2} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\tau_0}{T_{12}T_{21}}\right)^{\kappa+1}}{\kappa!(\kappa+1)!} \left\{ \exp\left[-\frac{T_{12} + T_{21}}{T_{12}T_{21}}(\tau - \tau_0)\right] \left(\frac{T_{21}}{T_{12}}\right)^{\frac{T_{21}(\tau-\tau_0)}{T_{12}}} \times \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[ \frac{T_{12}(\tau - \tau_0)^\kappa}{T_{21}} + \sum_{m=1}^{\kappa} (-1)^m \frac{\kappa(\kappa-1)\dots(\kappa-m+1)}{\left(\frac{T_{21}}{T_{12}}\right)^{m+1}} (\tau - \tau_0)^{\kappa-m} \right] + \\
& + \left[ \frac{T_{12} + T_{21}}{T_{12}T_{21}} (\tau - \tau_0) - 1 \right] \left( -\frac{1}{T_{21}} \right)^{-\frac{\tau - \tau_0}{T_{21}}} \left[ -T_{21}(\tau - \tau_0)^\kappa + \right. \\
& + \sum_{m=1}^{\kappa} (-1)^m \frac{\kappa(\kappa-1)\dots(\kappa-m+1)}{\left(-\frac{1}{T_{21}}\right)^{m+1}} (\tau - \tau_0)^{\kappa-m} \left. \right] - \frac{T_{12} + T_{21}}{T_{12}T_{21}} \times \\
& \times \left( -\frac{1}{T_{21}} \right)^{-\frac{\tau - \tau_0}{T_{21}}} \left[ \frac{(\tau - \tau_0)^{\kappa+1}}{\left(-\frac{1}{T_{21}}\right)} + \sum_{m=1}^{\kappa+1} (-1)^m \times \right. \\
& \times \left. \frac{(\kappa+1)\kappa(\kappa-1)\dots(\kappa-m+2)}{\left(-\frac{1}{T_{21}}\right)^{m+1}} (\tau - \tau_0)^{\kappa-m+1} \right]. \quad (14)
\end{aligned}$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Андриянов, И. М. Маслеников. Влияние распределенности параметров на динамические свойства теплообменников. Хим. пром., № 12, 22—28, 1963.
2. А. А. Таль. О динамических свойствах однофазных участков пароводяного тракта котла. Известия ОН АН ССР, № 2, 49—58, 1957.
3. А. А. Таль. Приближенное определение динамических свойств однофазных теплообменников. Теплоэнергетика, № 10, 69—71, 1957.
4. А. А. Арманд. Расчет переходных процессов в теплообменниках. Сб. «Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и в других специальных случаях». Госэнергоиздат, 113—136, 1959.
5. А. А. Арманд. Расчет переходных процессов в теплообменниках при переменных параметрах теплоносителя. Сб. «Повышение параметров пара и мощности агрегатов в теплоэнергетике». Госэнергоиздат, 479—493, 1961.
6. I. A. Slack, V. S. Agrasi and Treadwell, Dynamic Response of Heat Exchangers Having Internal Heat Sources — Part I, Trans. of the ASME, vol. 80, 612—624, 1958.
7. Е. П. Серов, Б. П. Корольков. Динамические характеристики элементов котлоагрегата. Теплоэнергетика, № 1, 15—18, 1965.
8. Б. П. Корольков. Переходные характеристики теплообменников с независимым обогревом. Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, № 3, 121—131, 1965.
9. А. И. Мицкевич. Переходный тепловой процесс в трубопроводе. Котлотурбостроение, вып. 45, Тр. ЦКТИ, 1964.
10. В. И. Сенькин. Переходный процесс в трубопроводе при наличии тепловыделения в стенке трубы. Котлотурбостроение, вып. 45, Тр. ЦКТИ, 1964.
11. И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. 106, Физматгиз, М., 1962.